

การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์โดย  
ใช้ตัวทำละลายผสม

นางสาวกษมา จันทรทิพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF TiO<sub>2</sub> NANOPARTICLES/CONJUGATED POLYMER COMPOSITES  
USING MIXED SOLVENT

Miss Kasama Chanthornthip

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์โดยใช้ตัวทำละลายผสม
โดย	นางสาวกษมา จันทรทิพย์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิศานาถ ไตรผล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รักชาติ ไตรผล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หรรหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพัตรา จินาวัดมน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิศานาถ ไตรผล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รักชาติ ไตรผล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รจนา พรประเสริฐสุข)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ แดงตีบ)

กษมา จันทรทิพย์ : การเตรียมวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียม ไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์โดยใช้ตัวทำละลายผสม. (PREPARATION OF TiO<sub>2</sub> NANOPARTICLES/CONJUGATED POLYMER COMPOSITES USING MIXED SOLVENT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. นิศานาถ ไตรผล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร. รักษาดิ ไตรผล, 199 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการเตรียมฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ poly [2-methoxy, 5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] (MEH-PPV) และ poly (3-hexylthiophene-2,5-dilyl) (P3HT) สำหรับนำไปใช้งานในอุปกรณ์โฟโตวอลเทจิก โดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างคลอโรเบนซีนหรือคลอโรฟอร์มกับแอลกอฮอล์ เพื่อช่วยให้ไทเทเนียมไดออกไซด์การกระจายตัวในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น โดยศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งในสารแขวนลอยและในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ สันฐานวิทยาของฟิล์มสมบัติการดูดกลืนแสงที่บ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ภายในฟิล์ม และสมบัติการคายแสงที่สัมพันธ์กับการแยกประจุของฟิล์ม ซึ่งจากการทดลองพบว่า แอลกอฮอล์ช่วยให้อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวได้ดีขึ้นในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และเมื่อทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบพบว่า การใช้ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้นทำให้ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลง แสดงถึงการแยกประจุที่ดีขึ้น เนื่องจากไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวได้ดีขึ้น ในขณะที่แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาวจะเกิดการตกค้างในฟิล์มและขัดขวางการแยกประจุ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้คอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชที การเติมแอลกอฮอล์จะทำให้เกิด self-assembly ของพอลิเมอร์และแยกเฟส ทำให้ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มไม่ลดลง เมื่อศึกษาในระบบของตัวทำละลายคลอโรฟอร์มพบว่า การเติมแอลกอฮอล์ไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาค จึงทำให้ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีมีสมบัติการคายแสงใกล้เคียงกัน นอกจากนี้อัตราการระเหยที่แตกต่างกันของตัวทำละลายยังส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่สัมพันธ์กับการแยกประจุของฟิล์ม

ภาควิชา: วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา: เทคโนโลยีเซรามิก..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา: 2554..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 5272729323 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : TITANIUM DIOXIDE/ CONJUGATED POLYMER/ PHOTOVOLTAIC CELL/  
MIXED SOLVENT

KASAMA CHANTHORNTHIP : PREPARATION OF  $\text{TiO}_2$  NANOPARTICLES/CONJUGATED  
POLYMER COMPOSITES USING MIXED SOLVENT. ADVISOR: ASST. PROF.  
NISANART TRAIIPHOL, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. RAKCHART  
TRAIIPHOL, Ph.D., 199 pp.

This research presented a fabrication process of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles/conjugated polymer composite films for photovoltaic application. Conjugated polymers included poly[2-methoxy, 5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene] (MEH-PPV) and poly(3-hexylthiophene-2,5-dilyl) (P3HT). Mixed solvents of chlorobenzene (CBZ) or chloroform (CF) and alcohols were used to enhance  $\text{TiO}_2$  dispersion in polymer matrix. Dispersion states of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles both in colloids and in films, surface morphology, light absorbance indicating polymer chain arrangements and photoluminescence (PL) intensity related to charge separation of the composite films were investigated. It was found that alcohols improved  $\text{TiO}_2$  dispersion in CBZ. The  $\text{TiO}_2$ /MEH-PPV films prepared from CBZ/alcohols with shorter hydrocarbon group showed a decrease in PL intensity, indicating higher charge separation, due to better particle dispersion states. On the other hand, the ones with longer hydrocarbon group, which remained in films and impeded charge separation. However, when P3HT was used, addition of alcohols resulted in self-assembly of P3HT and phase separation. PL intensity of the films was not decreased. In CF system, addition of alcohols was not affected  $\text{TiO}_2$  dispersion. Therefore, the  $\text{TiO}_2$ /MEH-PPV films exhibited similar PL intensity. In addition, differences in evaporation rate of solvents caused variations in particle arrangement, which might influenced PL intensity related to charge separation of the composite films.

Department: Material Science..... Student's signature .....

Field of Study: Ceramic Technology.... Advisor's signature.....

Academic Year: 2011..... Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ผศ. ดร. นิสานาถ ไตรผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) และ ผศ. ดร. รักษาติ ไตรผล (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ในการดำเนินงานวิจัยและการดำเนินชีวิต รวมทั้งมอบโอกาสและประสบการณ์ที่ดีในการทำงานวิจัยนี้ให้แก่ข้าพเจ้า

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ให้ความรู้ สั่งสอนวิชา และให้คำปรึกษาที่ดีในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ

MTEC Platform Project (MT-B-53-POL-26-481-G) ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านการเงินส่วนใหญ่ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษา การทำงานวิจัย และการนำเสนอผลงาน

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษา สถานที่ และเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

ผศ. ดร. เต็มศักดิ์ ศรีศิริพันธ์ และศุภณัฐนาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบตัวอย่างในงานวิจัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำในการศึกษาต่อ

สมาชิกภายในแล็บ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ตลอดจนบุคลากรที่ทำงานในภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาที่ดีตลอดระยะเวลาในการศึกษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งนางสาวธนิศา หิรัญประทีป ที่คอยช่วยสอนวิธีการใช้เครื่องมือต่างๆ และแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัววันทวิทย์ทุกท่านที่ให้การเลี้ยงดูอบรม สั่งสอน ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน จนทำให้การศึกษาสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	๗
สารบัญตาราง.....	๘
สารบัญรูปภาพ .....	๙
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก (Photovoltaic cell) .....	6
2.1.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก.....	7
2.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	10
2.3 คอนจูเกตพอลิเมอร์.....	14
2.3.1 คอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดเอ็มอีเอส-พีพีวี.....	17
2.3.2 คอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดพี3เอสที .....	17
2.4 วัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า .....	18
2.5 การกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกในสารแขวนลอย .....	19
2.6 หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์ .....	22
2.6.1 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) .....	23
2.6.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM) .....	26
2.6.3 โฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (Photoluminescence spectroscopy) .....	29
2.6.4 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared (IR) spectroscopy).....	34
2.6.5 การวัดการกระเจิงแสง (Laser light scattering) .....	39

2.6.6 การวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน (Thermo Gravimetric Analysis, TGA) .....	40
2.6.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) .....	41
2.6.8 ศักย์ซีต้า (Zeta potential) .....	42
2.6.9 การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) .....	44
2.7 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง .....	46
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	57
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย .....	57
3.1.1 คอนจูเกตพอลิเมอร์ .....	57
3.1.2 อนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	57
3.1.3 ตัวทำละลายหลัก .....	58
3.1.4 ตัวทำละลายที่ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่ง .....	59
3.2 การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสม .....	59
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสม .....	59
3.2.2 การศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสม .....	62
3.3 การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ .....	63
3.3.1 การเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ .....	63
3.3.2 การศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ .....	65
3.4 การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ .....	66
3.5 แผนผังงานวิจัย .....	68



บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	69
4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	69
4.1.1 เฟสของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	69
4.1.2 เฟส รูปร่าง และขนาดของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์.....	70
4.1.3 สมบัติการดูดกลืนแสงของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ที่กระจายตัวในน้ำ.....	70
4.1.4 สมบัติศักย์ซีต้าของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ pH ต่างๆ ในตัวกลางน้ำ .....	71
4.2 การศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ใน ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ .....	72
4.2.1 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลาย คลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม .....	72
4.2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม .....	74
4.2.3 สมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัวและขนาดอนุภาคของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง .....	76
4.2.4 สมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัว ขนาดอนุภาค และสัญญาณวิทยาของ อนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและ ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบ แรงอะตอม .....	78
4.3 การศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ คอนจูเกตพอลิเมอร์.....	83
4.3.1 การหาปริมาณของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ใน สารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ .....	83
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ใน สารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี .....	85

4.4	สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์.....	86
4.4.1	โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์.....	86
4.4.2	สัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/ แอลกอฮอล์.....	88
4.4.2.1	การหาความหนาของฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีและ ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียม จากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบ แรงอะตอม.....	88
4.4.2.2	สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและ ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ด้วยเทคนิค กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	90
4.4.3	สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลาย ผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์.....	93
4.4.4	สมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์.....	98
4.4.5	การหาปริมาณของแอลกอฮอล์ที่หลงเหลือภายในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์.....	103
4.5	การศึกษาผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ต่อคอนจูเกตพอลิเมอร์ต่อสมบัติทางกายภาพและทางแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ...	108

4.5.1	สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ .....	109
4.5.2	สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ .....	112
4.5.3	สมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียม ไดออกไซด์ต่างๆ.....	116
4.6	สมบัติทางกายภาพและแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ พี3เอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์.....	125
4.6.1	โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ พี3เอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ .....	126
4.6.2	สัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่ เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/ แอลกอฮอล์ .....	128
4.6.2.1	การหาความหนาของฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีและฟิล์มวัสดุ เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลาย คลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม .....	128
4.6.2.2	สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม .	129
4.6.3	สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ พี3เอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์.....	132

4.6.4	สมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ .....	138
4.6.5	สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ .....	143
4.6.6	สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ .....	146
4.6.7	สมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ.....	150
4.7	สมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ .....	157
4.7.1	สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ .....	158
4.7.2	สมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัวและขนาดอนุภาคของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง .....	158
4.7.3	สมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัว ขนาดอนุภาค และสัณฐานวิทยาของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม .....	160
4.8	สมบัติทางกายภาพและแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์.....	162

4.8.1	โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสม คลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์.....	162
4.8.2	สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลาย ผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์.....	164
4.8.3	สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลาย ผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์.....	166
4.8.4	สมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม และตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ .....	169
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	173
5.1	สรุปผลการวิจัย .....	173
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	174
	รายการอ้างอิง.....	175
	ภาคผนวก.....	187
	ภาคผนวก ก .....	188
	ภาคผนวก ข.....	188
	ภาคผนวก ค .....	189
	ภาคผนวก ง.....	190
	ภาคผนวก จ .....	191
	ภาคผนวก ฉ .....	192
	ภาคผนวก ช .....	193
	ภาคผนวก ซ .....	194
	ภาคผนวก ฌ .....	195
	ภาคผนวก ญ .....	196
	ภาคผนวก ฎ.....	196

ภาคผนวก ก.....	197
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	199

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์และอะนาเทส ..... 12

ตารางที่ 3.1 น้ำหนักของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์..... 59

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสมที่สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่างๆ ..... 60

ตารางที่ 3.3 น้ำหนักของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ ..... 64

ตารางที่ 4.1 ความขรุขระของตัวอย่าง ขนาดความกว้าง และความสูงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร..... 80

ตารางที่ 4.2 ความขรุขระของตัวอย่าง ขนาดความกว้าง และความสูงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.25 โดยปริมาตร..... 82

ตารางที่ 4.3 ความขรุขระของตัวอย่าง ขนาดความกว้าง และความสูงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 1 โดยปริมาตร..... 83

ตารางที่ 4.4 การทดสอบหาปริมาณของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน ..... 85

ตารางที่ 4.5 ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก..... 92

ตารางที่ 4.6	ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของสารเคมี ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	105
ตารางที่ 4.7	ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มวัสดุเชิง ประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลาย คลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณ ของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก.....	110
ตารางที่ 4.8	ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มวัสดุเชิง ประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลาย คลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณ ของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก.....	111
ตารางที่ 4.9	ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มคอนจูเกต พอลิเมอร์พี3เอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และฟิล์ม วัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลาย คลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณ ของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก.....	132
ตารางที่ 4.10	ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มวัสดุ เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลาย คลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณ ของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก.....	144
ตารางที่ 4.11	ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มวัสดุ เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลาย คลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณ ของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก.....	145
ตารางที่ 4.12	ความขรุขระของตัวอย่าง ขนาดความกว้าง และความสูง ของอนุภาคระดับ นาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลาย คลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ .....	161



ตารางที่ 4.13 ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มคอนจูเกต พอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีวีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม และฟิล์ม วัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีวีวีที่เตรียมจาก ตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์.....	166
---	-----

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ระดับพลังงานและกลไกการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบเฮเทอโรจังค์ชัน .....	2
รูปที่ 1.2 โครงสร้างของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก .....	3
รูปที่ 2.1 อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่ผลิตจากสารในกลุ่มผลึกซิลิกอนและกลุ่มพอลิเมอร์ .....	7
รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก .....	7
รูปที่ 2.3 ภาพจำลองของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบ bilayer heterojunction .....	8
รูปที่ 2.4 ภาพจำลองของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบ bulk heterojunction .....	9
รูปที่ 2.5 ภาพจำลองของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบ molecular heterojunction ...	9
รูปที่ 2.6 ภาพจำลองของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่เตรียมโครงสร้างแบบลำดับชั้น .....	10
รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	11
รูปที่ 2.8 กลไกของปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	13
รูปที่ 2.9 ระดับพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสกับ คอนจุกตพอลิเมอร์ชนิดเอ็มอีเอช-พีพีวี และพี3เอชที .....	14
รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างของพอลิอะเซทิลีน .....	14
รูปที่ 2.11 ลักษณะรูปร่างและการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในสารละลาย .....	17
รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของพี3เอชทีที่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็น ระเบียบสูง .....	18
รูปที่ 2.13 วัสดุกิ่งตัวนำชนิดเอ็น และชนิดพี .....	19
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์รวม ( $V_T$ ) และระยะห่างระหว่างอนุภาค ( $x$ ) ใน สารแขวนลอย .....	21
รูปที่ 2.15 ชนิดของ stabilization .....	22
รูปที่ 2.16 ระดับพลังงานของการเปลี่ยนสภาวะของอิเล็กตรอน .....	26
รูปที่ 2.17 การทำงานของกล่องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม .....	27
รูปที่ 2.18 โหมดการทำงานของกล่องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม .....	29
รูปที่ 2.19 singlet state และ triplet state .....	30
รูปที่ 2.20 ระดับพลังงาน Perrin-Jablonski ของการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสง .....	32
รูปที่ 2.21 หลักการทำงานของเครื่องลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ .....	34

รูปที่ 2.22 อินฟราเรดสเปกตรัมที่เกิดขึ้นที่บริเวณหมู่ฟังก์ชัน และบริเวณรอยนิ้วมือ .....	36
รูปที่ 2.23 รูปแบบการสั่นของพันธะ.....	37
รูปที่ 2.24 Michelson interferometer ใน FT-IR สเปกโทรมิเตอร์ .....	38
รูปที่ 2.25 หลักการของเทคนิคการวัดการกระเจิงแสง .....	39
รูปที่ 2.26 ทฤษฎีของมี (Mie's theory) .....	40
รูปที่ 2.27 ชั้นประจุไฟฟ้าคู่ที่ผิวของอนุภาค.....	43
รูปที่ 2.28 ผลของ pH ต่อค่าศักย์ซีต้า .....	44
รูปที่ 2.29 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของ Bragg .....	45
รูปที่ 2.30 ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ .....	46
รูปที่ 2.31 โครงสร้างแบบไบเลเยอร์เฮเทอโรจังก์ชันของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก.....	47
รูปที่ 2.32 โครงสร้างแบบบัลก์เฮเทอโรจังก์ชันของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่เตรียมด้วยวิธีต่างๆ ..	47
รูปที่ 2.33 โครงสร้างและระดับพลังงานของสารช่วยกระจายตัว OA และ BQ.....	48
รูปที่ 2.34 สเปกตรากการคายแสงของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีและ ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/ คอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่มีการปรับผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ด้วยสารที่มีลิแกนด์ชนิดต่างๆ.....	50
รูปที่ 2.35 ระดับพลังงานของลิแกนด์ ACA, CuPc และ N3 และภาพรวมแนวคิดของงานวิจัย ที่ศึกษาผลของการปรับคุณสมบัติของผิวของสารอินทรีย์ .....	50
รูปที่ 2.36 ขั้นตอนการเตรียมซิงก์นาโนคอลลอยด์.....	51
รูปที่ 2.37 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นลวดนาโน (nanowire) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ .....	53
รูปที่ 2.38 การกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ใน MDMO-PPVด้วยเทคนิค กล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน และสเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ อนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/MDMO-PPV ที่สัดส่วนของซิงก์ออกไซด์ต่างๆ .....	55
รูปที่ 2.39 สเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี และซิงก์ออกไซด์/พี3เอชซี ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและ ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร .....	55
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการเตรียมและศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสม .....	63

รูปที่ 3.2	ขั้นตอนในการเตรียมและศึกษาสมบัติของของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ในตัวทำละลายผสม .....	66
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนในการเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ .....	67
รูปที่ 3.4	แผนผังงานวิจัย .....	68
รูปที่ 4.1	xrd pattern ของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	69
รูปที่ 4.2	bright-field image และ diffraction pattern ของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียม ไดออกไซด์ ศึกษาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน .....	70
รูปที่ 4.3	สเปกตรากการดูดกลืนแสงของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ กระจายตัวในน้ำ .....	71
รูปที่ 4.4	ศักย์ซีต้าของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ pH ต่างๆ .....	72
รูปที่ 4.5	การกระจายขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร .....	73
รูปที่ 4.6	ค่า $d(0.1)$ , $d(0.5)$ และ $d(0.9)$ ของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของไทเทเนียม ไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/ แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร .....	74
รูปที่ 4.7	การดูดกลืนแสงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลาย คลอโรเบนซีน และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร .....	75
รูปที่ 4.8	การดูดกลืนแสงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลาย คลอโรเบนซีน ที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ .....	76
รูปที่ 4.9	ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ใน ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด ต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ ร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง .....	77

รูปที่ 4.10 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ..... 79

รูปที่ 4.11 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 0.25 โดยปริมาตร ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ..... 81

รูปที่ 4.12 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1 โดยปริมาตร ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ..... 83

รูปที่ 4.13 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและร้อยละของน้ำหนักที่คงเหลือของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีต่างๆ วิเคราะห์ด้วยเทคนิคภายใต้ความร้อน..... 84

รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ..... 86

รูปที่ 4.15 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ..... 87

รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยขีดและ Depth profile ของรอยขีดแสดงความหนาของฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ..... 89

- รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยขีดและ Depth profile ของรอยขีดแสดงความหนาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน..... 89
- รูปที่ 4.18 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางคอนจุกต์พอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม..... 90
- รูปที่ 4.19 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ..... 94
- รูปที่ 4.20 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของคอนจุกต์พอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีโมเลกุลเดี่ยวในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม..... 95
- รูปที่ 4.21 สัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก..... 95
- รูปที่ 4.22 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ ..... 97
- รูปที่ 4.23 สัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ..... 98

รูปที่ 4.24	สเปกตรากายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลาย ผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก .....	100
รูปที่ 4.25	ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม ไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก.....	101
รูปที่ 4.26	สเปกตรากายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ .....	102
รูปที่ 4.27	ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม ไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ.....	103
รูปที่ 4.28	การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ชนิดต่างๆ ที่สัดส่วนของแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร.....	107
รูปที่ 4.29	ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจาก ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม.....	109
รูปที่ 4.30	ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจาก ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม .....	111

- รูปที่ 4.31 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/  
เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม  
คลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ..... 113
- รูปที่ 4.32 สัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/  
เอ็มอีเอช-พีพีวีที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ที่เตรียมจากตัวทำละลาย  
ผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ  
9.04 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ..... 113
- รูปที่ 4.33 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/  
เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม  
คลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ..... 115
- รูปที่ 4.34 สัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/  
เอ็มอีเอช-พีพีวีที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ที่เตรียมจากตัวทำละลาย  
ผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ  
18.16 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ..... 115
- รูปที่ 4.35 สเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/  
เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม  
คลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ..... 117
- รูปที่ 4.36 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพันธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสม  
คลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 9.04  
โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ..... 117
- รูปที่ 4.37 สเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/  
เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม  
คลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ..... 119



รูปที่ 4.38 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ.....	119
รูปที่ 4.39 สเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ที่มีปริมาณของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ ก่อนและหลังอบ .....	121
รูปที่ 4.40 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ ก่อนและหลังอบ.....	121
รูปที่ 4.41 สเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ ก่อนและหลังอบ .....	122
รูปที่ 4.42 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียม ไดออกไซด์ต่างๆ ก่อนและหลังอบ.....	123
รูปที่ 4.43 สเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ ก่อนและหลังอบ .....	124
รูปที่ 4.44 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ ก่อนและหลังอบ .....	124
รูปที่ 4.45 คอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชที่ชนิดที่มีการจัดเรียงตัวของของโมเลกุลภายใน สายโซ่พอลิเมอร์เป็นระเบียบสูง (regioregular).....	125

รูปที่ 4.46 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ..... 126

รูปที่ 4.47 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยขีดและ Depth profile ของรอยขีดแสดงความหนาของฟิล์มคอนจูเกตพี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ..... 128

รูปที่ 4.48 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยขีดและ Depth profile ของรอยขีดแสดงความหนาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ..... 129

รูปที่ 4.49 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก..... 130

รูปที่ 4.50 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ..... 133

รูปที่ 4.51 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีชนิดโมเลกุลเดี่ยวในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ..... 135

รูปที่ 4.52 สัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก..... 135

รูปที่ 4.53 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ พี3เอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ.....	136
รูปที่ 4.54 สัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ พี3เอชที ที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ.....	137
รูปที่ 4.55 สเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/ แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก.....	139
รูปที่ 4.56 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพันธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและ ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก .....	140
รูปที่ 4.57 สเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/ แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของ ไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ.....	141
รูปที่ 4.58 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพันธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและ ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ .....	142

- รูปที่ 4.59 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/  
พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม  
คลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก..... 143
- รูปที่ 4.60 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/  
พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม  
คลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก..... 145
- รูปที่ 4.61 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/  
พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม  
คลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ..... 147
- รูปที่ 4.62 สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560/450 นาโนเมตร และ 605/450  
นาโนเมตร ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียม  
จากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล  
ที่ปริมาณของไทเทเนียม ไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก  
ก่อนและหลังอบ ..... 147
- รูปที่ 4.63 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/  
พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม  
คลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของ  
ไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ..... 148
- รูปที่ 4.64 สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560/450 นาโนเมตร และ 605/450  
นาโนเมตร ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียม  
จากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล  
ที่ปริมาณของไทเทเนียม ไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก  
ก่อนและหลังอบ ..... 149

รูปที่ 4.65 สเปกตรากายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที  
 ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/  
 เมทานอลร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์  
 เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ ..... 150

รูปที่ 4.66 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ  
 ไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและ  
 ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์  
 เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ ..... 151

รูปที่ 4.67 สเปกตรากายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที  
 ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/  
 เมทานอลร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์  
 เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ ..... 152

รูปที่ 4.68 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ  
 ไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและ  
 ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์  
 เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ก่อนและหลังอบ ..... 152

รูปที่ 4.69 สเปกตรากายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที  
 ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ  
 ก่อนและหลังอบ ..... 154

รูปที่ 4.70 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ  
 ไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน  
 ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ ก่อนและหลังอบ ..... 154

รูปที่ 4.71 สเปกตรากายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที  
 ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร  
 ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ ก่อนและหลังอบ ..... 155

รูปที่ 4.72 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม  
 ไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ  
 10 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ ก่อนและหลังอบ ..... 156

รูปที่ 4.73 สเปกตรากายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ ก่อนและหลังอบ .....	156
รูปที่ 4.74 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม ไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ ก่อนและหลังอบ .....	157
รูปที่ 4.75 การดูดกลืนแสงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลาย คลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ .....	158
รูปที่ 4.76 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ใน ตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง .....	159
รูปที่ 4.77 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ใน ตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม .....	160
รูปที่ 4.78 พื้นผิวของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและ ตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ .....	163
รูปที่ 4.79 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจาก ตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ .....	165
รูปที่ 4.80 สเปกตรากายดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสม คลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ก่อนและหลังอบ .....	168
รูปที่ 4.81 สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ของฟิล์มวัสดุ เชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลาย คลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ก่อนและหลังอบ .....	168

รูปที่ 4.82 สเปกตรากายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสม คลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ก่อนและหลังอบ .....	170
รูปที่ 4.83 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม และตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ก่อนและหลังอบ .....	171
รูปที่ 4.84 สเปกตรากายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลาย คลอโรฟอร์ม และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโร เบนซีน/เมทานอลและตัวทำละลายผสม คลอโรฟอร์ม/เมทานอล ที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร .....	172
รูปที่ 4.85 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลและ ตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอล ที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร.....	172

## บทที่ 1

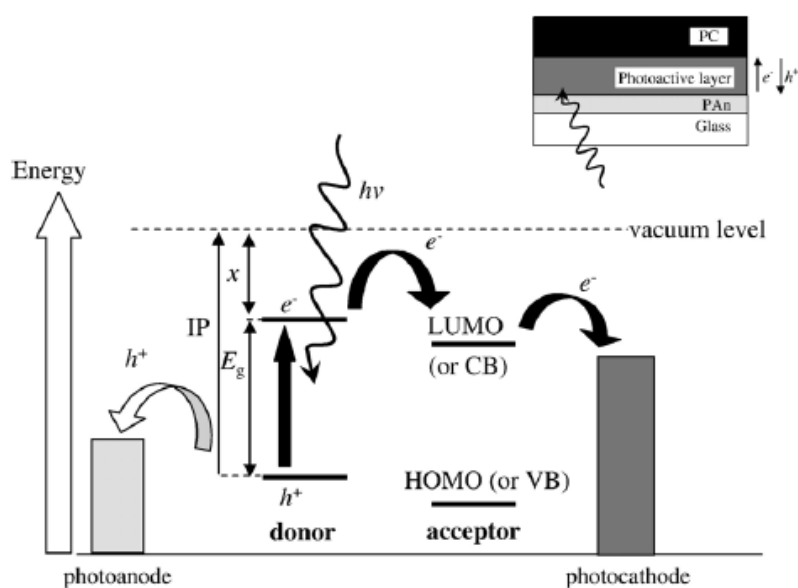
### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในสภาวะปัจจุบันพลังงานเชื้อเพลิงต่างๆ ที่นำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าวันละยังมีปริมาณน้อยลงและอาจจะหมดไปได้ในอนาคต จึงทำให้ต้องมีการพัฒนาและคิดค้นแหล่งพลังงานขึ้นมาใหม่เพื่อนำมาใช้แทนแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงเดิม หรือที่เรียกว่า พลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือก ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่กำลังเป็นที่สนใจเนื่องจากเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูง สามารถแปลงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยใช้เซลล์สุริยะ โดยในช่วงแรกของการผลิตเซลล์สุริยะนั้นจะมุ่งความสนใจไปที่การใช้สารในกลุ่มของผลึกซิลิคอนเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสูง แต่ก็พบปัญหาว่ามีต้นทุนในการผลิตที่สูงมากทำให้นำไปใช้งานได้จำกัด ต่อมาจึงได้มีการพัฒนามาเป็นเซลล์สุริยะแบบพลาสติกโดยการนำสารอินทรีย์มาใช้แทน ซึ่งสารอินทรีย์ที่นิยมใช้คือคอนจูเกตพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้จากการที่มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวอย่างต่อเนื่องบนสายโซ่หลักและมี p-orbital ซ้อนทับกันจึงทำให้สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ ยกตัวอย่างเช่น พี3เซทที (P3HT), เอ็มอีเอช-พีพีวี (MEH-PPV) เป็นต้น ข้อดีของเซลล์สุริยะแบบพลาสติกคือมีต้นทุนในการผลิตต่ำและมีความยืดหยุ่นสูง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่ได้นั้นยังคงค่อนข้างต่ำเนื่องจากเกิดการแยกและลำเลียงประจุได้น้อย ส่งผลให้มีประจุไปสะสมที่ขั้วไฟฟ้าได้น้อยด้วยเช่นกัน ซึ่งการแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยการสร้างอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบเฮเทอโรจังก์ชัน โดยใช้สารอินทรีย์หรือคอนจูเกตพอลิเมอร์กับสารอนินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำ เช่น ซิงก์ออกไซด์ (ZnO), ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>), ทินออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) เป็นต้น ซึ่งมีกลไกการทำงานดังรูปที่ 1.1 คอนจูเกตพอลิเมอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (donor) จะรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้น และอิเล็กตรอนอิสระนี้จะมีการเปลี่ยนระดับพลังงานจากชั้นบนสุดของออร์บิทัลที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็มหรือ HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) ไปยังระดับพลังงานชั้นต่ำสุดของออร์บิทัลที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลยหรือ LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) ของคอนจูเกตพอลิเมอร์ จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังระดับพลังงาน LUMO ของสารอนินทรีย์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) แล้วเคลื่อนที่ไปสะสมที่ขั้วแคโทดต่อไป สารอนินทรีย์หรือตัวรับอิเล็กตรอน

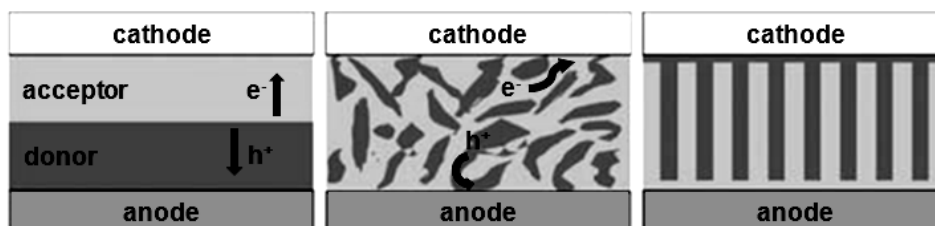


จึงเป็นเสมือนสะพานที่ช่วยให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดได้ง่ายขึ้น ในขณะที่โฮลหรือประจุบวกที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นคอนจูเกตพอลิเมอร์ไปสะสมที่ขั้วแอโนดที่อยู่ด้านตรงข้ามทำให้เกิดการแยกประจุขึ้น ทั้งนี้ตัวให้อิเล็กตรอนที่เลือกใช้จะต้องมีระดับพลังงาน LUMO สูงกว่าระดับพลังงาน LUMO ของตัวรับอิเล็กตรอน และระดับพลังงาน LUMO ของตัวรับอิเล็กตรอนจะต้องสูงกว่าระดับพลังงานของขั้วแคโทดเช่นกัน ในขณะที่ระดับพลังงาน HOMO ของตัวให้อิเล็กตรอนจะต้องต่ำกว่าระดับพลังงานของขั้วแอโนดเสมอ เพื่อให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนและโฮลได้หรือเกิดการแยกประจุที่ตัวเอง<sup>[1]</sup>



รูปที่ 1.1 ระดับพลังงานและกลไกการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบเฮเทอโรจังก์ชัน<sup>[1]</sup>

การสร้างอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบเฮเทอโรจังก์ชัน โดยใช้วัสดุเชิงประกอบสารอินทรีย์/คอนจูเกตพอลิเมอร์มีการพัฒนาเป็นลำดับ เริ่มจากโครงสร้างแบบไบเลเยอร์เฮเทอโรจังก์ชัน (bilayer heterojunction) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (ก) ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้จะทำให้เกิดการแยกและส่งผ่านประจุได้น้อย เนื่องจากจะเกิดการแยกกันของประจุเฉพาะที่บริเวณผิวสัมผัสของทั้งสองเฟสเท่านั้น อีกทั้งยังไม่มีช่องทางในการลำเลียงประจุไปที่ขั้วไฟฟ้า จึงทำให้อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นไม่สามารถเคลื่อนที่ไปขั้วไฟฟ้าได้ ส่งผลเกิดการกลับมารวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนและโฮล (recombination)<sup>[1]</sup>



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกแบบ (ก) เฮเทอโรจังก์ชันไบเลเยอร์ (ข) บัลด์เฮเทอโรจังก์ชันที่มีโครงสร้างแบบอุโมงค์เชื่อมต่อกัน (ค) บัลด์เฮเทอโรจังก์ชันที่มีโครงสร้างแบบแท่ง<sup>[2]</sup>

ต่อมาจึงได้มีการพัฒนาโดยการปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นแบบบัลด์เฮเทอโรจังก์ชัน (Bulk heterojunction) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะของเฟสของสารอินทรีย์และเฟสของคอนจูเกตพอลิเมอร์แทรกกันอยู่และเชื่อมต่อกันเป็นอุโมงค์ขนาดเล็ก (Interconnected channel) ดังรูปที่ 1.2 (ข) หรือโครงสร้างแบบแท่ง (รูปที่ 1.2 (ค)) เพื่อทำหน้าที่ลำเลียงอิเล็กตรอนและโฮลไปยังขั้วไฟฟ้าแต่ละด้าน ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้จะทำให้พื้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างสองเฟสมีมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการแยกประจุที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการสร้างอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกให้มีโครงสร้างแบบบัลด์เฮเทอโรจังก์ชันสามารถทำได้ยาก เนื่องจากสารอินทรีย์และคอนจูเกตพอลิเมอร์มีสมบัติความเป็นขั้วที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้เกิดการแยกเฟสกัน งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีต่างๆ เช่น การใช้สารช่วยกระจายตัว<sup>[3]</sup> ซึ่งพบว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวในระบบกลับทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสของสารอินทรีย์และเฟสของคอนจูเกตพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากสารช่วยกระจายตัวจะไปเคลือบบนผิวของสารอินทรีย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกลดลงด้วย หรือการใช้เทคนิคการขึ้นรูป เช่น แท่งนาโน<sup>[83], [84]</sup> เส้นลวดนาโน<sup>[80]</sup> นาโนอิมพริ้นติง<sup>[2], [4], [5]</sup> เป็นต้น ซึ่งมีวิธีการที่ค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน รวมทั้งประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่ได้ยังมีค่าค่อนข้างต่ำอีกด้วย ลำดับต่อมาจึงมีการศึกษาวิธีการอีกแบบหนึ่งที่น่าสนใจซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อนและสามารถควบคุมการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ในคอนจูเกตพอลิเมอร์ได้ นั่นคือการใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างตัวทำละลายหลักที่สามารถละลายคอนจูเกตพอลิเมอร์ได้กับตัวทำละลายที่ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งสำหรับปรับผิวของอนุภาคระดับนาโนให้มีสมบัติที่สามารถกระจายในตัวทำละลายหลักและเมทริกซ์คอนจูเกตพอลิเมอร์ได้ดี<sup>[6], [7]</sup>

อย่างไรก็ตามในการศึกษาที่ผ่านมาแล้วยังไม่มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของตัวทำละลายผสมอย่างเป็นระบบ เช่น ชนิดของตัวทำละลายหลักและตัวทำละลายที่ทำหน้าที่เป็น

สารเติมแต่ง สัดส่วนระหว่างตัวทำละลายผสม เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเตรียมวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์กับคอนจูเกตพอลิเมอร์สองชนิดคือเอ็มอีเอช-พีพีวีและพี3เอชทีเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์โฟโตวอลเทจิก โดยใช้คลอโรเบนซีนและคลอโรฟอร์มซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับคอนจูเกตพอลิเมอร์ผสมกับสารในกลุ่มแอลกอฮอล์ที่น่าจะช่วยปรับการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ดีขึ้น ซึ่งได้แก่ เมทานอล เอทานอล 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล ทั้งนี้เนื่องจากแอลกอฮอล์จะมีส่วนหัวที่มีขั้วที่สามารถจับกับผิวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้และมีส่วนหางที่ไม่มีขั้วที่สามารถเข้ากันได้ดีกับเมทริกซ์คอนจูเกตพอลิเมอร์ โดยในการศึกษาจะทำการเปลี่ยนชนิดของแอลกอฮอล์รวมทั้งสัดส่วนของตัวทำละลายทั้งสองชนิดอย่างเป็นระบบและปรับเปลี่ยนสัดส่วนระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์และคอนจูเกตพอลิเมอร์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของคอนจูเกตพอลิเมอร์และการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ภายในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติในการแยกและลำเลียงประจุและประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์และคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงแสงของวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์
2. ศึกษาผลของสัดส่วนโดยปริมาตรระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์และคอนจูเกตพอลิเมอร์ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมและศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางแสงของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมมาจากตัวทำละลายผสม โดยปรับเปลี่ยนชนิดและสัดส่วนของตัวทำละลายหลักและตัวทำละลายที่ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่ง และสัดส่วนของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์
2. เตรียมและศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่เตรียมมาจากตัวทำละลายผสม โดยปรับเปลี่ยนชนิดและสัดส่วนของตัวทำละลายหลักและตัวทำละลายที่ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่ง

ชนิดของคอนจุกเกตพอลิเมอร์ สัดส่วนของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ และผลของกระบวนการทางความร้อน

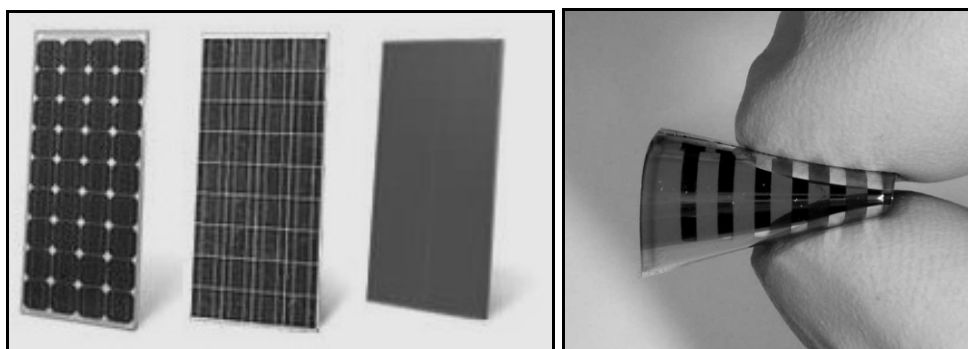
#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้วัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจุกเกตพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพในการแยกประจุสูงและส่งต่อประจุได้ดีเหมาะสำหรับการประยุกต์เป็นอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกในเซลล์สุริยะ

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก (Photovoltaic cell)

อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ผลิตจากวัสดุกึ่งตัวนำ ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าในเซลล์สุริยะ (solar cell) ซึ่งโดยทั่วไปในการผลิตอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกนั้นจะมุ่งเน้นให้ความสนใจไปที่การใช้สารในกลุ่มของผลึกซิลิกอน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน (PCE) สูง โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 24 อย่างไรก็ตามก็อุปกรณ์ชนิดนี้มีค่อนข้างราคาแพง ซึ่งมีสาเหตุมาจากวิธีการผลิตที่ต้องใช้อุณหภูมิสูง เช่น การถลุง การทำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น และมีขั้นตอนหลายขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อน ต่อมาจึงได้มีการนำพอลิเมอร์ที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้หรือคอนจูเกตพอลิเมอร์มาเป็นตัวเลือก ซึ่งมีข้อดีคือมีต้นทุนในการผลิตต่ำเนื่องจากมีวิธีการผลิตที่ง่าย สามารถเตรียมในรูปแบบของสารละลายและขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางที่มีความยืดหยุ่นได้ จึงทำให้ใช้งานได้หลากหลาย แต่จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกชนิดนี้จะให้ค่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าสูงสุดเพียงร้อยละ 5 เท่านั้นซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่เตรียมจากซิลิกอน ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการแยกและลำเลียงประจุได้น้อย ส่งผลให้มีประจุไปสะสมที่ขั้วไฟฟ้าได้น้อยซึ่งทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีปริมาณน้อยด้วยเช่นกัน การแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยการทำโครงสร้างแบบเฮเทอโรจังชันของคอนจูเกตพอลิเมอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนกับสารอนินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เช่น ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) ทินออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) แคดเมียมซัลไฟด์ (CdSe) เป็นต้น ทั้งนี้ตัวให้อิเล็กตรอนที่เลือกใช้จะต้องมีระดับพลังงาน LUMO สูงกว่าระดับพลังงาน LUMO หรือแถบพลังงานนำกระแสของตัวรับอิเล็กตรอน และระดับพลังงาน LUMO ของตัวรับอิเล็กตรอนจะต้องสูงกว่าระดับพลังงานของขั้วแคโทดเช่นกัน ในขณะที่ระดับพลังงาน HOMO ของตัวให้อิเล็กตรอนจะต้องต่ำกว่าระดับพลังงานของขั้วแอนโนดเสมอ เพื่อให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนและโฮลได้หรือเกิดการแยกประจุที่นั่นเอง โดยอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่ผลิตจากสารในกลุ่มผลึกซิลิกอนและสารในกลุ่มพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.1



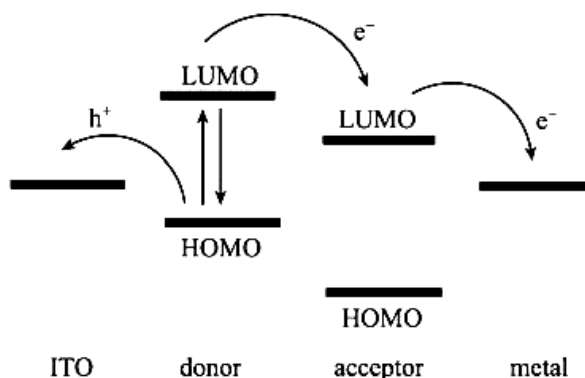
(ก)

(ข)

รูปที่ 2.1 อุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่ผลิตจาก (ก) สารในกลุ่มผลึกซิลิกอน<sup>[8], [9]</sup> และ (ข) สารในกลุ่มพอลิเมอร์<sup>[2]</sup>

### 2.1.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก

เมื่อวัสดุกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแสงอาทิตย์ จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้น โดยอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากชั้น HOMO หรือแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังชั้น LUMO หรือแถบพลังงานนำกระแสที่มีพลังงานสูงกว่าของวัสดุกึ่งตัวนำนั้น จากนั้นอิเล็กตรอนอิสระจะเคลื่อนที่ต่อไปยังระดับพลังงาน LUMO ของวัสดุกึ่งตัวนำอีกตัวที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (acceptor) และเคลื่อนที่ไปสะสมที่ขั้วแคโทดเป็นลำดับสุดท้าย ในขณะที่โฮลที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดิมของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นไปจะเคลื่อนที่ไปสะสมที่ขั้วแอโนดที่อยู่ด้านตรงข้ามกันจึงทำให้เกิดการแยกประจุขึ้น (charge separation) และส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด โดยเมื่อทำการต่อขั้วไฟฟ้าทั้งสองเข้าด้วยกันก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลภายในอุปกรณ์ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก<sup>[10]</sup>

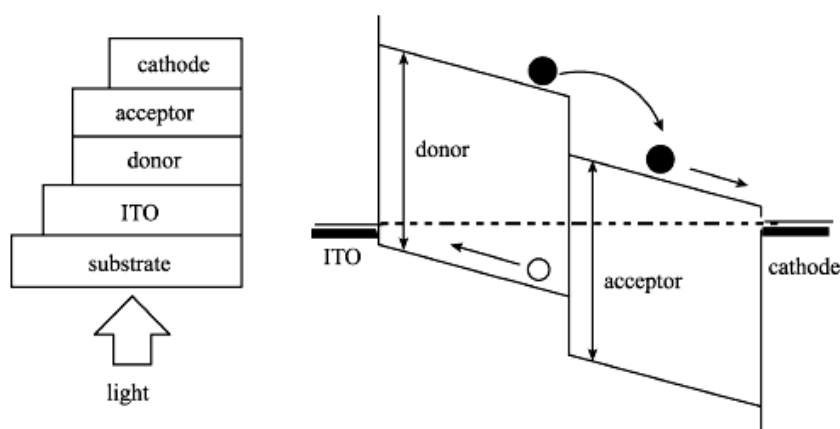
การเตรียมชั้นของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกในเซลล์สุริยะแบบพลาสติก สามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

### 1) โฮโมจังก์ชัน (Homojunction) <sup>[10]</sup>

เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดสามารถทำได้โดยการนำฟิล์มบางของคอนจูเกตพอลิเมอร์ไปประกอบกับขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง โดยที่เมื่อคอนจูเกตพอลิเมอร์ได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้น จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังระดับพลังงาน LUMO ทำให้เกิดโฮลขึ้นที่ระดับพลังงาน HOMO แล้วเคลื่อนที่ต่อไปยังขั้วไฟฟ้าที่อยู่ฝั่งตรงข้าม โดยประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่ได้นั้นมีค่าต่ำมาก (น้อยกว่าร้อยละ 0.1) เนื่องจากไม่มีตัวรับอิเล็กตรอนจึงทำให้ประจุกลับมารวมตัวกันและเกิดการแยกประจุได้น้อย

### 2) ไบเลเยอร์เฮเทอโรจังก์ชัน (Bilayer heterojunction) <sup>[10]-[12]</sup>

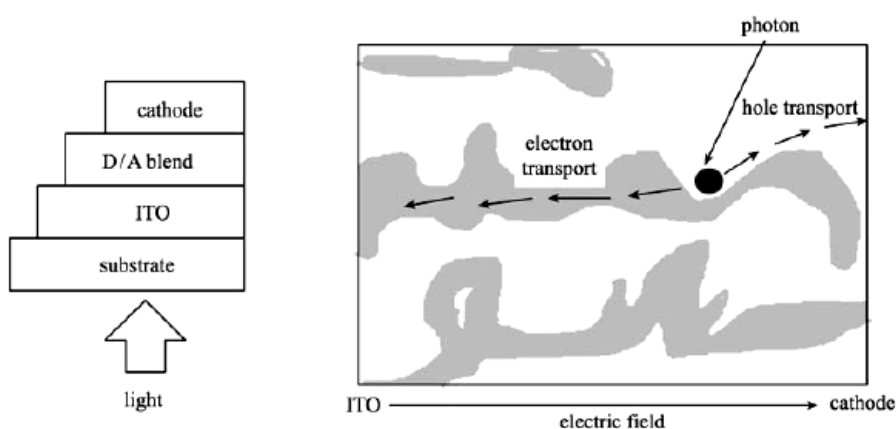
วิธีนี้สามารถทำได้โดยเตรียมชั้นของตัวรับอิเล็กตรอนหรืออนุภาคของสารอินทรีย์บนชั้นของตัวให้อิเล็กตรอนหรือคอนจูเกตพอลิเมอร์ ซึ่งตัวรับอิเล็กตรอนจะต้องมีระดับพลังงาน LUMO ที่ต่ำกว่าตัวให้อิเล็กตรอนเพื่อให้สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วแคโทดได้ ดังรูปที่ 2.3 อย่างไรก็ตาม โครงสร้างลักษณะนี้จะทำให้เกิดการแยกของประจุที่บริเวณรอยต่อของชั้นวัสดุเท่านั้น และยังมีข้อจำกัดในระยะทางที่อิเล็กตรอนและโฮลจะสามารถเคลื่อนที่แยกออกจากกันไปยังขั้วไฟฟ้าได้ ซึ่งจะต้องอยู่ห่างจากรอยต่อไม่เกิน 10 นาโนเมตร แต่ฟิล์มควรมีความหนามากกว่า 100 นาโนเมตร เพื่อให้สามารถดูดกลืนแสงได้มาก ดังนั้นโครงสร้างนี้จึงทำให้เกิดการแยกประจุได้น้อย



รูปที่ 2.3 ภาพจำลองของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบ bilayer heterojunction

### 3) แบบกระจายหรือบัลค์เฮเทอโรจังก์ชัน (Dispersed or Bulk heterojunction) <sup>[10], [13]</sup>

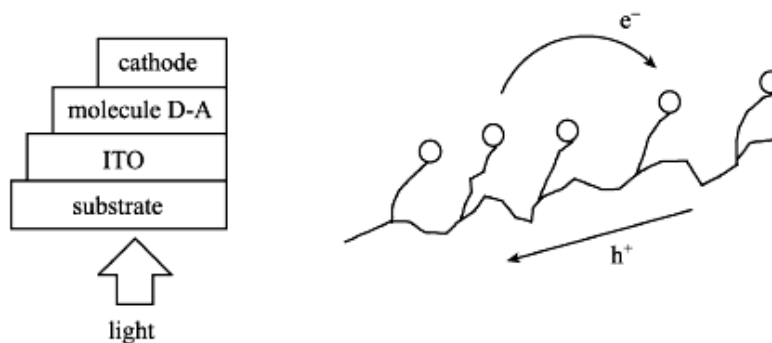
สามารถทำได้โดยการเตรียมสารละลายที่ประกอบด้วยตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้จะช่วยให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองเฟสและช่องทางในการลำเลียงประจุไปยังขั้วไฟฟ้ามากขึ้น ดังรูปที่ 2.4 จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะต้องมีการคำนึงถึงชนิดของตัวทำละลายที่เลือกใช้ ความเร็วในการระเหยของตัวทำละลาย การละลายและเข้ากันได้ของตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งมีผลต่อสัญญาณวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางและการกระจายตัวของวัสดุที่นำมาผสมกัน



รูปที่ 2.4 ภาพจำลองของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบ bulk heterojunction

### 4) เฮเทอโรจังก์ชันระดับโมเลกุล (Molecular heterojunction) <sup>[10], [14]</sup>

สามารถทำได้โดยการเชื่อมต่อโมเลกุลของตัวรับอิเล็กตรอนบนสายโซ่พอลิเมอร์ของตัวให้อิเล็กตรอน หรือใช้บล็อกโคพอลิเมอร์ (block copolymer) ของตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 2.5 อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของโครงสร้างลักษณะนี้ยังคงต่ำอยู่

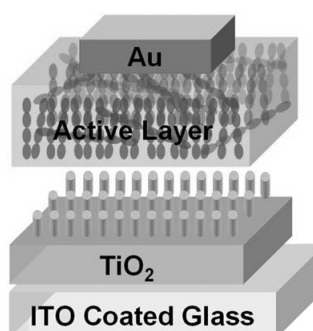


รูปที่ 2.5 ภาพจำลองของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบ molecular heterojunction



### 5) การเตรียมโครงสร้างแบบลำดับชั้น<sup>[5]</sup>

สามารถทำได้โดยการเตรียมชั้นของวัสดุอินทรีย์ให้มีลักษณะรูปร่างและการจัดเรียงตัวตามที่ต้องการบนชั้นสเตรต ตามด้วยการเตรียมชั้นของวัสดุอินทรีย์ทับลงไป ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งช่วยให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองเฟสมากขึ้น ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่ดี แต่มีขั้นตอนการเตรียมที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนและต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง



รูปที่ 2.6 ภาพจำลองของอุปกรณ์โฟโตโวลเทอิกที่เตรียมโครงสร้างแบบลำดับชั้น<sup>[5]</sup>

### 1.12.2 ไทเทเนียมไดออกไซด์

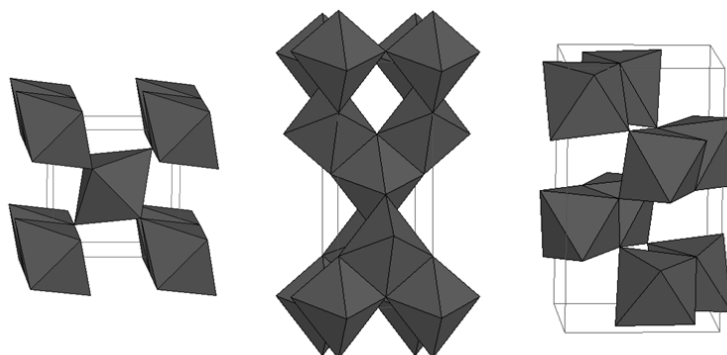
ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม (Ti) ที่มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีลักษณะโดยทั่วไปคือ เป็นของแข็งสีขาว ทึบแสง และมีค่าดัชนีหักเหสูง โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่<sup>[15], [16], [106], [107]</sup>

1) รูไทล์ (rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง และมีสมบัติในการหักเหและสะท้อนแสงสูง จึงนิยมนำมาใช้เป็นอนุภาคในผลิตภัณฑ์สีเพื่อให้สีขาว และสารกันแดดชนิดสะท้อนแสงในครีมกันแดด

2. อะนาเทส (anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล (tetragonal) มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงสูงที่สุด และสามารถเปลี่ยนโครงสร้างผลึกไปเป็นแบบรูไทล์ได้เมื่อให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส

3. บรูไคต์ (brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) ไม่นิยมนำมาใช้ เนื่องจากมีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำ พบได้น้อยตามธรรมชาติ และสังเคราะห์ได้ยาก

โครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์แบบรูไทล์ อะนาเทส และบรูไคต์ ในรูปของ  $\text{TiO}_2^{6-}$  ซึ่งเป็นพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมประกบกันหรือที่เรียกว่าออกตะฮีดรอล (octahedral) ดังรูปที่ 2.7 โดยโครงสร้างผลึกทั้ง 3 แบบนี้มีลักษณะการบิดตัวของออกตะฮีดรอลและรูปแบบการจัดเรียงตัวของออกตะฮีดรอลที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์เกิดจากการเรียงต่อกันโดยใช้ส่วนขอบของออกตะฮีดรอล ในขณะที่โครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสเกิดจากการเรียงต่อกันโดยใช้ส่วนยอดของออกตะฮีดรอล และโครงสร้างผลึกแบบบรูไคต์เกิดจากการเรียงต่อกันโดยใช้ทั้งส่วนยอดและส่วนขอบของออกตะฮีดรอล



รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไดออกไซด์<sup>[17], [106]</sup>

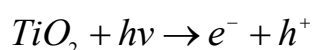
จากการที่มีการจัดเรียงตัวของออกตะฮีดรอลที่แตกต่างกันจึงส่งผลให้แต่ละโครงสร้างมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันด้วย เช่น ความหนาแน่นและโครงสร้างทางไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้มีค่าพลังงานของแถบพลังงานช่องว่างต่างกันคือ 3.02 eV สำหรับโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์และ 3.20 eV สำหรับโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส จึงทำให้มีสมบัติทางแสงที่แตกต่างกัน โดยที่โครงสร้างผลึกแบบรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 410 นาโนเมตร อีกทั้งยังเกิดการกลับมารวมตัวกันใหม่ของประจุได้ง่าย ในขณะที่โครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 385 นาโนเมตร และมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ โดยคุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์และอะนาเทสดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์และอะนาทส

คุณสมบัติ	รูไทล์	อะนาทส
Band gap energy (eV)	3.02	3.20
ความแข็ง (Mohs)	6.0-7.0	5.5-6.0
ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	4.25	3.90
Gibbs free energy (kcal/mole)	-212.6	-211.4
ช่วงความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด (นาโนเมตร)	~410	~385
Lattice constant, a (Å <sup>0</sup> )	4.59	3.78
Lattice constant, c (Å <sup>0</sup> )	2.96	9.52
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	1858	เปลี่ยนเฟสเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส

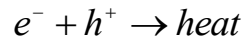
โดยทั่วไปแล้ว วัสดุกึ่งตัวนำจะมีแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band) กับแถบพลังงานนำกระแส (Conduction band) อยู่ห่างกัน โดยจะมีแถบพลังงานช่องว่าง (Band gap) อยู่ระหว่างแถบพลังงานทั้งสอง เมื่ออิเล็กตรอน (e<sup>-</sup>) ที่อยู่ในแถบพลังงานวาเลนซ์ได้รับพลังงานโฟตอนจากแสง อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังแถบพลังงานนำกระแส ทำให้เกิดโฮล (h<sup>+</sup>) ที่เป็นประจุบวกขึ้น หรือที่เรียกว่า การเกิดคู่อิเล็กตรอน/โฮล (Electron/Hole Pairs, e<sup>-</sup>/h<sup>+</sup>) ซึ่งระยะเวลาที่ทำให้การเกิดคู่อิเล็กตรอน/โฮลนั้นจะสั้นมาก โดยในไทเทเนียมไดออกไซด์จะใช้ระยะเวลาเพียง 10<sup>-15</sup> วินาทีเท่านั้น<sup>[106]</sup> การเกิดคู่อิเล็กตรอน/โฮลของไทเทเนียมไดออกไซด์ดังแสดงในสมการ<sup>[108]</sup>

การกระตุ้นด้วยแสง:

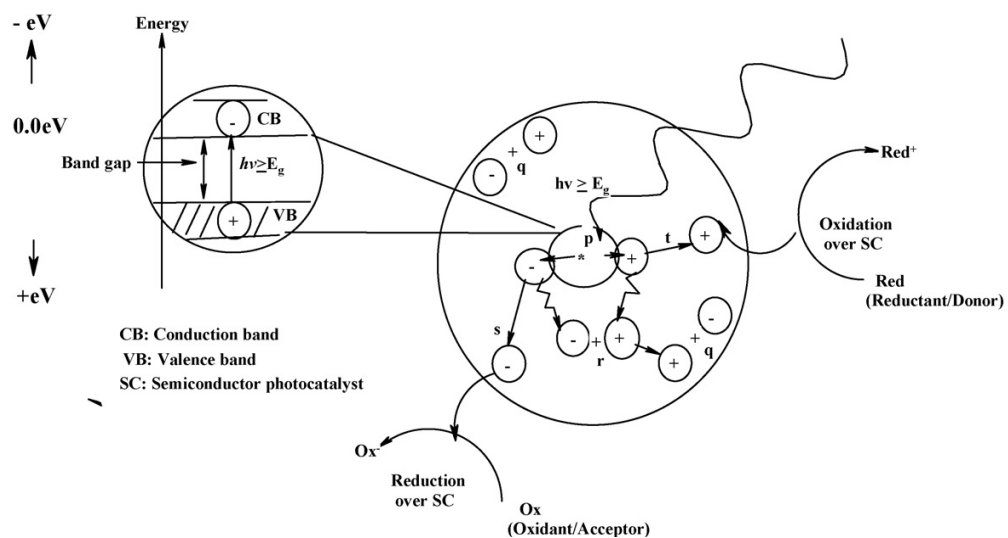


ในขณะที่การกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและโฮลในวัสดุกึ่งตัวนำนั้นเกิดได้ยาก เนื่องจากมีแถบพลังงานช่องว่างคั่นอยู่ จึงทำให้คู่อิเล็กตรอนและโฮลแยกกันได้นาน โดยในไทเทเนียมไดออกไซด์จะใช้ระยะเวลาในการกลับมารวมกันของประจุประมาณ 10<sup>-7</sup> วินาที ซึ่งกลไกต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

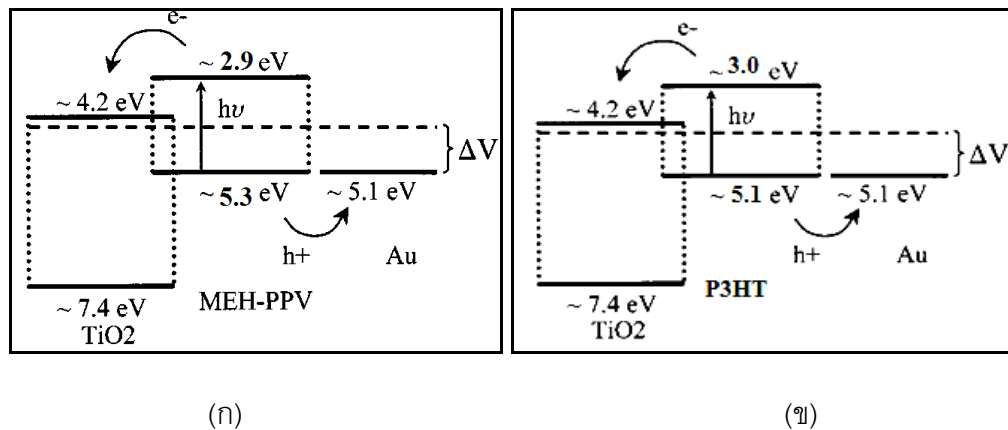
การกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอน/โฮล (Electron/hole recombination):



โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ข้อมูลภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสเนื่องจากมีระดับพลังงานที่เหมาะสมกับระดับพลังงานของคอนจูเกตพอลิเมอร์ทั้งชนิดเอ็มอีเอช-พีพีวีและพี3เอชที กล่าวคือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสจะมีค่าพลังงานของแถบพลังงานช่องว่างเท่ากับ 3.2 eV โดยมีแถบพลังงานวาเลนซ์เท่ากับ -4.2 eV และแถบพลังงานนำกระแสเท่ากับ -7.4 eV ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงาน LUMO ของคอนจูเกตพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด (-2.9 และ -3.0 eV ในเอ็มอีเอช-พีพีวีและพี3เอชที ตามลำดับ) ดังรูปที่ 2.9 ดังนั้นจึงทำให้สามารถลำเลียงประจุไปยังขั้วไฟฟ้าได้และเกิดการแยกประจุที่ดี<sup>[5]</sup>



รูปที่ 2.8 กลไกของปฏิกิริยากระตุ้นด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยที่ (p) การเกิดแสงของคู่อิเล็กตรอนโฮล (q) การกลับมารวมกันของประจุที่ผิว (r) การกลับมารวมกันของประจุภายในบัลก์ (s) การแพร่ของตัวรับอิเล็กตรอนและปฏิกิริยารีดักชันบนผิวของวัสดุที่ตัวนำ และ (t) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวให้อิเล็กตรอนบนผิวของวัสดุที่ตัวนำ<sup>[108]</sup>



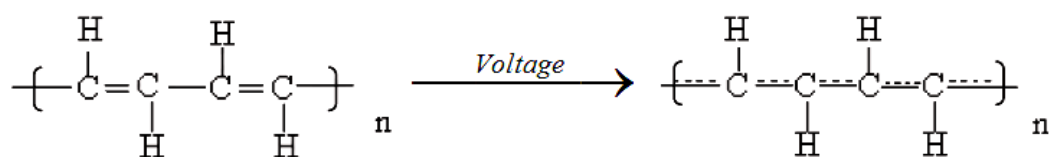
รูปที่ 2.9 ระดับพลังงานของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสกับคอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิด (ก) เอ็มอีเอช-พีพีวี และ (ข) พี3เอชที<sup>[18]</sup>

### 2.3 คอนจูเกตพอลิเมอร์

คอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer หรือ conducting polymer)<sup>[19]</sup> เป็นวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) สามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากคอนจูเกตพอลิเมอร์เป็นโมเลกุล ระดับพลังงานจึงแยกออกจากกันและไม่เป็นแถบติดกัน โดยค่าความต่างของพลังงานระหว่างระดับพลังงานบนสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่หรือ HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) กับระดับพลังงานล่างสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุหรือ LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) หรือ HOMO-LUMO gap จะเกี่ยวข้องกับสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของโมเลกุล เช่น สมบัติการดูดกลืนแสง เป็นต้น

สามารถแบ่งคอนจูเกตพอลิเมอร์ออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ

1) พอลิเมอร์ที่สายโซ่หลักมีพันธะคู่หรือพันธะสามสลับกับพันธะเดี่ยวอย่างต่อเนื่อง ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปยังอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ตามแนวพันธะได้ (delocalization) ดังรูปที่ 2.10 จึงทำให้เกิดการนำไฟฟ้า เช่น พอลิอะเซทิลีน พอลิไทโอฟีน พอลิแอนีลีน เป็นต้น



รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างของพอลิอะเซทิลีน<sup>[20]</sup>

2) พอลิเมอร์ที่สายโซ่หลักไม่มีโครงสร้างพันธะคู่หรือพันธะสามสลับกับพันธะเดี่ยว แต่มีหมู่แทนที่ที่มีพายอิเล็กตรอน ( $\pi$ -electron) หรือมีโลหะแทรนซิชันอยู่ด้วย โดยเมื่อถูกกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากหมู่หนึ่งไปยังหมู่เคียงข้างที่อยู่ใกล้ๆ กันได้ เช่น พอลิ-1-ไวนิลไพร์น พอลิ-เอ็น-ไวนิลคาร์บาไซล เป็นต้น

คอนจูเกตพอลิเมอร์ประกอบด้วยสายโซ่ของโมเลกุลที่มีหลายระนาบทั้งส่วนที่ตรงเป็นระนาบเดียวกันและส่วนที่บิดโค้งเป็นเกลียว โดยอิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้เฉพาะส่วนที่ตรงเป็นระนาบเดียวกันเท่านั้นเนื่องจากมีพายออร์บิทัล ( $\pi$ -orbital) ที่ต่อเนื่องกัน เรียกระยะนี้ว่า ระยะคอนจูเกต (conjugation length) ซึ่งในการนำไปใช้งานเราสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติของคอนจูเกตพอลิเมอร์ให้มีสมบัติอย่างที่ต้องการได้ โดยมี 2 แนวทางหลักคือ

1) การสังเคราะห์คอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดใหม่ขึ้นมา โดยการดัดแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์เพื่อให้มีสมบัติตามที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มหมู่แทนที่ด้านข้าง alkoxy ในคอนจูเกตพอลิเมอร์พีวีที่มีสีเหลืองซึ่งทำให้ได้เป็นเอ็มอีเอช-พีวีที่มีสีแดง<sup>[21]</sup> โดยการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากพลังงานที่ลดลงของ HOMO-LUMO gap ทั้งนี้เนื่องจากหมู่แทนที่ด้านข้างช่วยเพิ่มอิเล็กตรอนให้แก่สายโซ่หลัก รวมทั้งการหมุนรอบสายโซ่หลักของเอ็มอีเอช-พีวีที่เกิดขึ้นได้ยากขึ้น โดยมีสาเหตุมาจากการเกิดอันตรกิริยาอย่างอ่อนๆ ระหว่างอะตอมของออกซิเจนในหมู่แทนที่ด้านข้างกับไฮโดรเจนที่อยู่บนสายโซ่หลักในตำแหน่งของหมู่ไวนิล ส่งผลให้โมเลกุลอยู่ในระนาบได้มากขึ้น มีระยะคอนจูเกตที่ยาวขึ้น และมีการดูดกลืนแสงเลื่อนไปยังตำแหน่งที่มีความยาวคลื่นยาวขึ้น (red shift)

2) การควบคุมการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ด้วยการควบคุมรูปร่าง พฤติกรรมการจัดเรียงตัว และการเข้าจับกันของสายโซ่ ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล และระหว่างโมเลกุล รวมทั้งความยาวของระยะคอนจูเกต ซึ่งพฤติกรรมการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์จะมีความแตกต่างกันเมื่ออยู่ในรูปของสารละลายและฟิล์มบาง โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ปรัชญาการณ์ ดังต่อไปนี้

#### Intramolecular effect

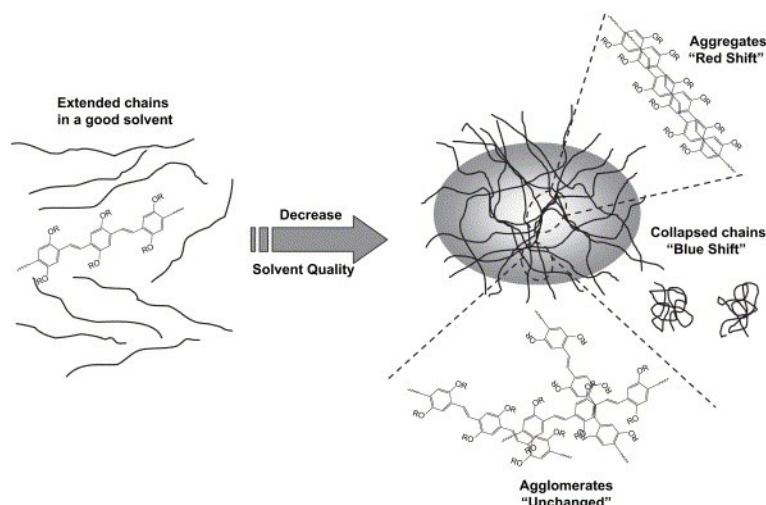
เป็นปรัชญาการณ์การเคลื่อนที่ของพายอิเล็กตรอนภายในสายโซ่ของโมเลกุลเดียวกัน โดยศึกษาได้จากสมบัติการดูดกลืนแสงของสายโซ่ของโมเลกุลเดี่ยว (isolated chains) ในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะรูปร่างของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ โดยทั่วไปสามารถจำแนก

ได้เป็น 2 แบบคือ สายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการยืดตัว (extended chains) และสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการม้วนตัว (collapsed chains) ซึ่งขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กับตัวทำละลายที่เลือกใช้ โดยการยืดตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดจากการใช้ตัวทำละลายที่ดี (good solvent) ทำให้อันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กับตัวทำละลายเกิดขึ้นได้ดี เป็นเหตุให้พายอิเล็กทรอนิกส์ตรอนในสายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้และมีระยะคอนจูเกตยาวขึ้น โดยจะแสดงสมบัติการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นยาวขึ้น (red shift) ในขณะที่การม้วนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดจากการใช้ตัวทำละลายที่ไม่ดี (poor solvent) ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์และตัวทำละลายเกิดขึ้นได้ไม่ดี ซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของพายอิเล็กทรอนิกส์ตรอนในสายโซ่พอลิเมอร์และทำให้มีระยะคอนจูเกตสั้นลง โดยจะแสดงสมบัติการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นสั้นลง (blue shift)

#### Intermolecular effect

เป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของพายอิเล็กทรอนิกส์ตรอนระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยศึกษาได้จากสมบัติการดูดกลืนแสงของสายโซ่พอลิเมอร์ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงหรือในฟิล์มบาง ซึ่งโดยทั่วไปสายโซ่พอลิเมอร์จะมีการจัดเรียงตัวได้หลายรูปแบบ แต่ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะการจัดเรียงตัวแบบ aggregation และ agglomeration เท่านั้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การจัดเรียงตัวแบบ aggregation คือการที่สายโซ่พอลิเมอร์เรียงตัวซ้อนทับกันอย่างเป็นระเบียบ (interchain stacking) ด้วยแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้พายออร์บิทัลของหลายๆ โมเลกุลเกิดการซ้อนทับกัน พายอิเล็กทรอนิกส์ตรอนจึงสามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ข้างเคียงได้ การจัดเรียงตัวแบบ aggregation สามารถดูได้จากสมบัติการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นยาวขึ้น ซึ่งคาดว่าน่าจะส่งผลให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นด้วย
- การจัดเรียงตัวแบบ agglomeration คือการที่สายโซ่พอลิเมอร์เกาะกันอย่างไม่เป็นระเบียบหรือเกิดการม้วนตัว ทำให้ไม่มีการซ้อนทับกันของพายออร์บิทัล ส่งผลให้ไม่มีการเคลื่อนที่ของพายอิเล็กทรอนิกส์ตรอนระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงคาดว่าสมบัติการนำไฟฟ้าน่าจะไม่ดีตามไปด้วย ซึ่งลักษณะรูปร่างและการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในสารละลายดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะรูปร่างและการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในสารละลาย [22]

### 2.3.1 คอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดเอ็มอีเอช-พีพีวี [1]

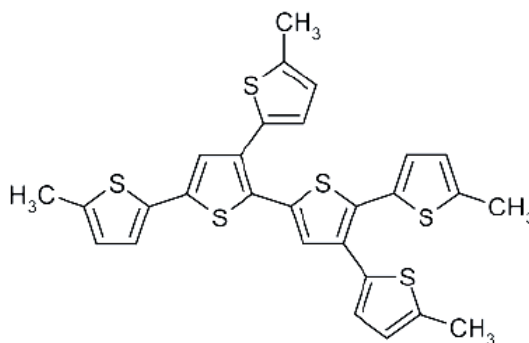
คอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดเอ็มอีเอช-พีพีวี (poly[2-methoxy, 5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene], MEH-PPV) มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้าชนิดพีที่มีค่าพลังงานของแถบพลังงานช่องว่างเท่ากับ 2.4 eV โดยมีระดับพลังงาน HOMO เท่ากับ -2.9 eV และ LUMO เท่ากับ -5.3 eV สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดีทำให้ขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถเกิดการเปล่งแสงได้ จึงนิยมนำมาใช้ในเทคโนโลยี organic light emitting diode (OLED) และใช้ในการผลิตเซลล์สุริยะแบบพลาสติก รวมไปถึงการพัฒนาไปเป็นเซนเซอร์ทางเคมีโดยอาศัยสมบัติการเรืองแสงที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม

### 2.3.2 คอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดพี3เอชที [1]

คอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดพี3เอชที (poly-3-hexylthiophene, P3HT) มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้าชนิดพีที่มีค่าพลังงานของแถบพลังงานช่องว่างเท่ากับ 2.1 eV โดยมีระดับพลังงาน HOMO เท่ากับ -3.0 eV และ LUMO เท่ากับ -5.1 eV ซึ่งโดยทั่วไปนิยมนำพี3เอชทีที่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นระเบียบสูงหรือมีการจัดเรียงตัวแบบหัวต่อหาง (Head-to-Tail) มากกว่าร้อยละ 98 มาใช้ในอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นระเบียบนี้จะช่วยให้อิเล็กทรอนิกส์สามารถกระโดดไปมาระหว่างสายโซ่ที่อยู่เคียงข้างได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังมีแนวโน้มที่จะตกผลึกได้ง่ายส่งผลให้มีระยะคอนจูเกตที่ยาวขึ้น และมีค่าพลังงาน



ของแถบพลังงานช่องว่างลดลง โดยโครงสร้างทางเคมีของพี3เอชทีที่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นระเบียบสูงดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของพี3เอชทีที่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นระเบียบสูง [23]

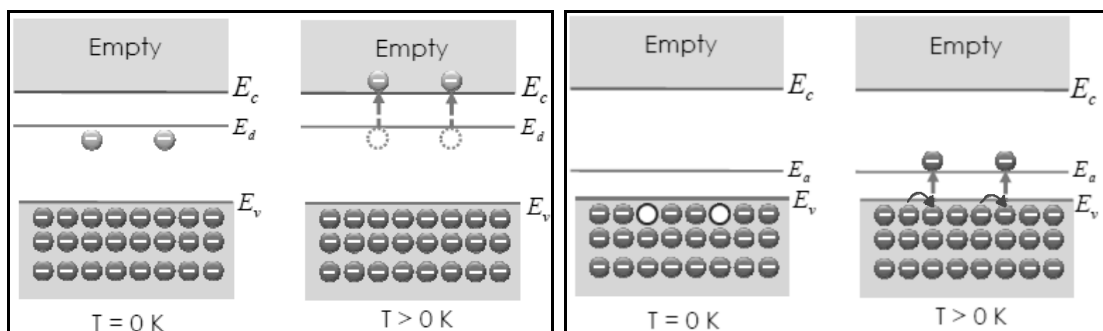
## 2.4 วัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า [24]-[26]

ทั้งไทเทเนียมไดออกไซด์และคอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดเอ็มอีเอช-พีพีวีและพี3เอชทีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ต่างก็มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า โดยที่ไทเทเนียมไดออกไซด์มีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ในขณะที่คอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดเอ็มอีเอช-พีพีวีและพี3เอชทีมีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วัสดุกึ่งตัวนำ เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้า (Conductor) และฉนวนไฟฟ้า (Insulator) โดยวัสดุประเภทนี้จะสามารถนำไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อได้รับพลังงานหรือมีการกระตุ้นที่ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band) มีพลังงานสูงกว่าพลังงานของแถบพลังงานช่องว่าง เช่น การให้ความร้อนหรือพลังงานแสง เป็นต้น จนสามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบพลังงานนำกระแส (Conduction band) ได้ โดยแบ่งออกเป็น

- วัสดุกึ่งตัวนำบริสุทธิ์หรือวัสดุกึ่งตัวนำชนิดไอ (i-semiconductor) เป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่สามารถนำไฟฟ้าได้เอง เช่น ซิลิกอน (Si) เยอรมานีอัม (Ge) เนื่องจากมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกันระหว่างอะตอมที่อยู่เคียงข้างกันและจับกับด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง เมื่อวัสดุได้รับพลังงานจึงทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดหลุดออกไปได้และเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระขึ้น

- **วัสดุกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-semiconductor)** เป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอนเกินมาในโครงสร้าง โดยอิเล็กตรอนนี้จะมีพลังงานอยู่ในระดับ donor state ซึ่งอยู่ใกล้กับแถบพลังงานนำกระแส ดังนั้นเมื่อวัสดุชนิดนี้ได้รับพลังงานที่มากพอ อิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ไปยังแถบพลังงานนำกระแสเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระขึ้น ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 2.13 (ก)
- **วัสดุกึ่งตัวนำชนิดพี (p-semiconductor)** เป็นวัสดุกึ่งตัวนำที่มีจำนวนช่องว่างของอิเล็กตรอนหรือโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนอิสระ โดยเมื่อให้พลังงานแก่วัสดุกึ่งตัวนำชนิดนี้ อิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมข้างเคียงจะเข้ามาแทนที่ในโฮล จึงทำให้ดูเหมือนโฮลเคลื่อนที่ได้ ดังรูปที่ 2.13 (ข)



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.13 วัสดุกึ่งตัวนำ (ก) ชนิดเอ็น และ (ข) ชนิดพี <sup>[25]</sup>

## 2.5 การกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกในสารแขวนลอย <sup>[27]-[29]</sup>

การกระจายตัวของอนุภาคเซรามิกในสารแขวนลอยสามารถอธิบายได้ด้วยผลของแรงดึงดูด แรงผลัก หรือค่าพลังงานศักย์ระหว่างอนุภาค โดยได้มีการแบ่งแรงระหว่างอนุภาคออกเป็น 3 ประเภทคือ

- **แรงดึงดูดชนิดแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals attractive force)** เป็นแรงดึงดูดทางไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างขั้วคู่ชนิดถาวรและขั้วคู่ชนิดเหนี่ยวนำที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาค

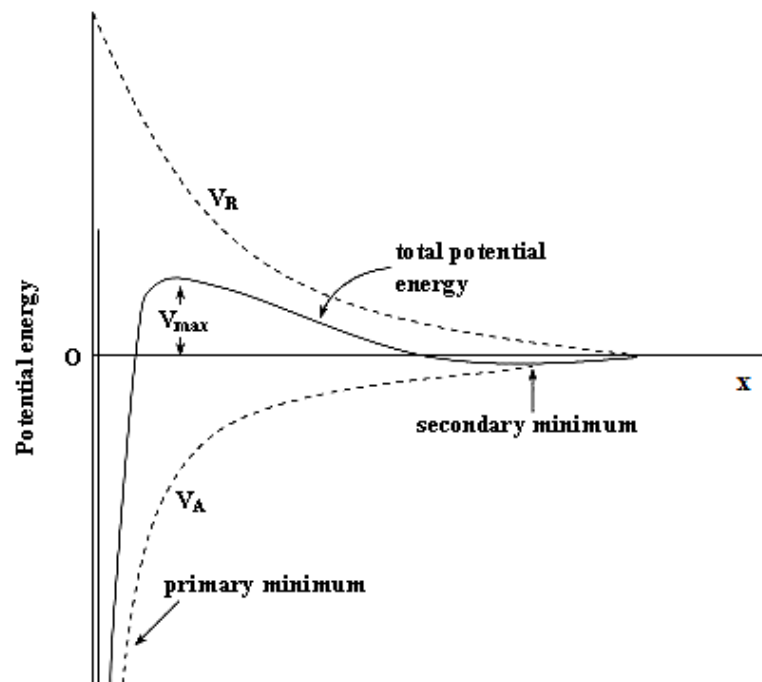
- แรงทางไฟฟ้า (Electrostatic force) เป็นแรงผลักระหว่างอนุภาคที่มีประจุบนพื้นผิวชนิดเดียวกัน หรือแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคที่มีประจุบนพื้นผิวต่างชนิดกัน ซึ่งมักพบในกรณีที่อนุภาคเซรามิกกระจายตัวอยู่ในของเหลวที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงๆ
- แรงผลักระหว่างอนุภาค Steric force เป็นแรงผลักระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่เกาะอยู่บนผิวของอนุภาค โดยจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กันมากจนกระทั่งสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการซ้อนทับกัน

จากทฤษฎี DLVO โดย Deryaguin กับ Landau และ Verwey กับ Overbeek ได้อธิบายไว้ว่า เสถียรภาพของการแขวนลอยของอนุภาคในตัวกลางขึ้นอยู่กับพลังงานศักย์รวม ดังสมการ

$$V_T = V_A + V_R + V_S$$

เมื่อ	$V_T$	=	พลังงานศักย์รวม (total potential energy) มีหน่วยเป็นจูล
	$V_A$	=	พลังงานศักย์ดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals attractive potential energy)
	$V_R$	=	พลังงานศักย์ผลักระหว่างอนุภาค (repulsive potential energy)
	$V_S$	=	พลังงานศักย์เนื่องมาจากตัวกลาง

โดยสามารถประมาณได้ว่า  $V_T = V_A + V_R$  เนื่องจาก  $V_S$  มีค่าน้อยมาก และเมื่อนำค่าพลังงานศักย์ทั้งหมดมาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างอนุภาค ( $x$ ) พบว่า เมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กันมาก ( $x$  มีค่าเข้าใกล้ 0) พลังงานศักย์ดึงดูด ( $V_A$ ) จะมีอิทธิพลต่อพลังงานศักย์รวม ( $V_T$ ) มากกว่าพลังงานศักย์ผลักระหว่างอนุภาค ( $V_R$ ) ทำให้  $V_T$  มีค่าติดลบ แต่เมื่ออนุภาคอยู่ห่างกันมากขึ้น ( $x$  มีค่ามากขึ้น)  $V_R$  จะมีอิทธิพลต่อ  $V_T$  มากขึ้นจึงทำให้  $V_T$  มีค่าเป็นบวก จนกระทั่งมีค่าเป็นบวกสูงที่สุด ( $V_{max}$ ) และเมื่ออนุภาคอยู่ห่างจากกันออกไปอีก  $V_A$  และ  $V_R$  จะมีอิทธิพลต่อ  $V_T$  เท่ากัน ทำให้เกิดความสมดุลของพลังงานศักย์ ดังนั้น  $V_T$  จึงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังรูปที่ 2.14 นอกจากนี้ถ้าอนุภาคสองอนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาชนกันด้วยพลังงานจลน์ที่มีค่ามากกว่า  $V_R$  ก็จะทำให้อนุภาคทั้งสองเข้ามาอยู่ใกล้กันมากพอที่จะทำให้  $V_A$  สามารถดึงอนุภาคให้เข้ามาชิดกันและเกิดแรงดึงดูดต่อกันได้ จนกระทั่งเกิดการเกาะตัวกันขึ้น (agglomeration) และเมื่ออนุภาคหลายอนุภาคเข้ามาเกาะตัวกันมากขึ้นก็จะทำให้เกิดการตกตะกอน (flocculation) ของกลุ่มอนุภาคลงสู่ก้นภาชนะ โดยการตกตะกอนนี้สามารถเปลี่ยนกลับมาแขวนลอยอยู่ในสมดุลอีกครั้งได้<sup>[30]</sup>



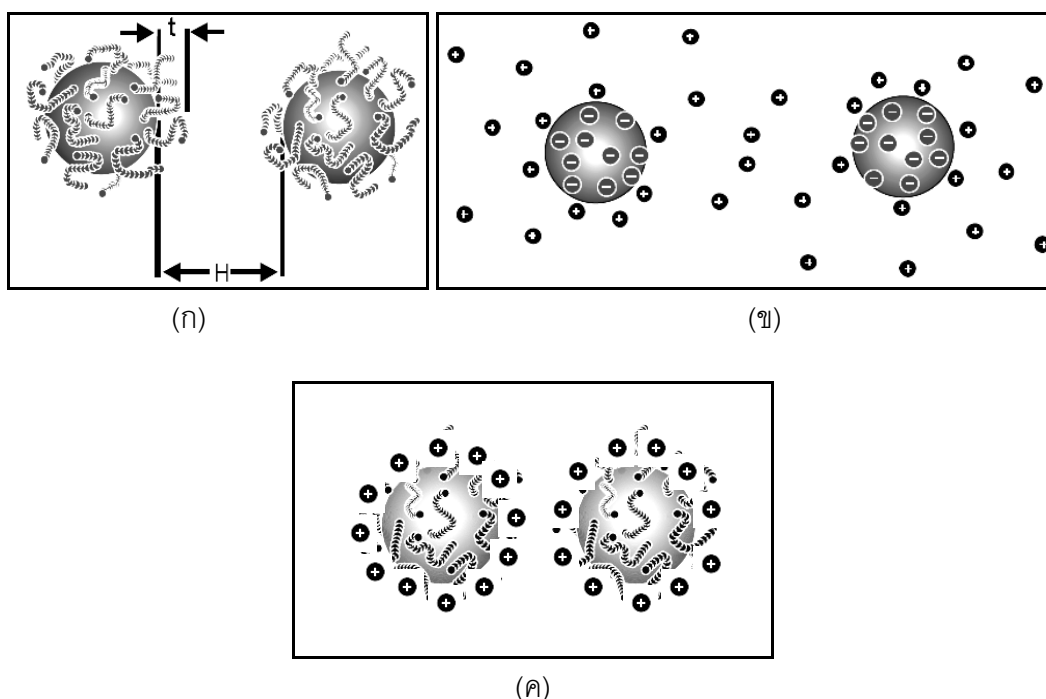
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์รวม ( $V_T$ ) และระยะห่างระหว่างอนุภาค ( $x$ ) ในสารแขวนลอย<sup>[32]</sup>

จะเห็นได้ว่าถ้าพลังงานศักย์ดึงดูดหรือแรงดึงดูดมีมากกว่าพลังงานศักย์ผลักหรือแรงผลักก็จะทำให้อนุภาคเกาะตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่ แต่ถ้าพลังงานศักย์ผลักมีมากกว่าพลังงานศักย์ดึงดูดก็จะทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวอยู่ห่างออกจากกันเป็นอนุภาคเดี่ยว โดยกระบวนการที่ทำให้อนุภาคเซรามิกสามารถกระจายตัวอยู่ในสารแขวนลอยได้อย่างเสถียรโดยไม่เกิดการเกาะตัวกันแล้วตกตะกอนลงมา มีทั้งหมด 3 แบบ คือ<sup>[31], [33]</sup>

1) Steric stabilization เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคกระจายตัวในสารแขวนลอยได้โดยใช้พอลิเมอร์เป็นสารช่วยกระจายตัว ซึ่งพอลิเมอร์ที่ใช้จะต้องสามารถเกาะบนผิวของอนุภาคและยึดตัวออกไปในตัวทำละลายได้ โดยความเกาะเกาะของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ยึดตัวออกไปจะทำให้เกิดแรงผลักออสโมซิสดันให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากกัน ดังรูปที่ 2.15 (ก)

2) Electrostatic stabilization เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคกระจายตัวในสารแขวนลอยได้โดยอาศัยแรงผลักระหว่างประจุบนพื้นผิวของอนุภาคและประจุจากการแตกตัวของอิเล็กโทรไลต์ (electric double layer) ดังรูปที่ 2.15 (ข) ซึ่งขนาดของแรงผลักนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาแน่นของประจุที่ผิวของอนุภาคและตัวกลางที่ใช้

3) Electrosteric stabilization เป็นการทำให้อนุภาคกระจายตัวในสารแขวนลอยได้โดยใช้สารช่วยกระจายตัวประเภทพอลิอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งทำให้เกิดแรงผลักระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ (steric repulsion) และแรงผลักรวมกันที่เกิดจากการแตกตัวของพอลิเมอร์ประเภทอิเล็กโทรไลต์ (electrostatic repulsion) ดังรูปที่ 2.15 (ค) แรงผลักรวมกันนี้จะช่วยให้การเพิ่มระยะห่างระหว่างอนุภาคมีประสิทธิภาพสูงและเกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดี



รูปที่ 2.15 (ก) Steric stabilization (ข) Electrostatic stabilization และ (ค) Electrosteric stabilization<sup>[33]</sup>

## 2.6 หลักการและเทคนิคในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคต่างๆ ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ (characterization) ของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์และสมบัติของสารแขวนลอยและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ดังต่อไปนี้ (1) อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) โหมตการดูดกลืนแสง ใช้ในการวิเคราะห์อนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายและการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในตัวทำละลายและในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ (2) กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM) ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำ

ละลายบนชั้นสเตรตและสัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ (3) โฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี (Photoluminescence spectroscopy) ใช้ในการศึกษาสมบัติการคายแสงที่สัมพันธ์กับการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ (4) อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared (IR) spectroscopy) ใช้ในการวัดปริมาณแอลกอฮอล์ภายในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ (5) การวัดการกระเจิงของแสง (Laser light scattering) ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสม (6) การวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน (Thermo Gravimetric Analysis, TGA) ใช้ในการหาปริมาณอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ (7) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) ใช้ในการหาขนาดของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์และตรวจสอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ (8) ศักย์ซีต้า (Zeta potential) และ (9) การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ (characterization) ซึ่งได้แก่ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ผิวและเฟสของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ตามลำดับ โดยหลักการของเทคนิคดังกล่าวข้างต้นแสดงดังต่อไปนี้

### 2.6.1 อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) <sup>[34]-[38]</sup>

อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลต (180-400 นาโนเมตร) และช่วงวิสิเบิล (400-800 นาโนเมตร) ที่ทะลุผ่าน (transmitted) หรือถูกดูดกลืน (absorbed) โดยโมเลกุลของสารตัวอย่างและการกระจายขนาดของอนุภาค โดยมีหลักการพื้นฐานคือ เมื่อโมเลกุลของสารตัวอย่างถูกฉายแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลและได้รับพลังงานที่เท่ากับพลังงานที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในโมเลกุล แสงบางส่วนจะถูกดูดกลืนเอาไว้ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน (electron transition) จากสถานะพื้น (ground state) ที่มีพลังงานต่ำไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) ที่มีพลังงานสูงกว่า ในขณะที่แสงบางส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืนจะเกิดการสะท้อนกลับ (reflection) การกระเจิง (scattering) และส่วนที่เหลือจะทะลุผ่านออกมาจากสารตัวอย่าง (transmittance) ซึ่งแสงที่ทะลุผ่านมานี้จะผ่านไปยังตัวตรวจวัดเพื่อนำมาวัดเทียบปริมาณแสงกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นต่างๆ โดยที่ค่าการดูดกลืนแสงของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสงตามกฎของ Beer-Lambert ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จึงสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยค่าความยาวคลื่น

ของแสงที่ถูกดูดกลืนสามารถใช้ในการระบุชนิดของสารได้ ในขณะที่จำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสงจะใช้ในการบอกปริมาณของสารที่นำมาวิเคราะห์

### กฎการดูดกลืนแสง

- (1) กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) (ค.ศ.1760) กล่าวว่า แสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของตัวกลางที่แสงผ่าน

$$I_t = I_0 \times 10^{-kl}$$

- (2) กฎของเบียร์ (Beer's law) (ค.ศ.1852) กล่าวว่า แสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร ซึ่งเมื่อคำนวณเช่นเดียวกับกฎของแลมเบิร์ตจะได้สมการ

$$I_t = I_0 \times 10^{-kc}$$

และเมื่อรวมกฎทั้งสองเข้าด้วยกัน (Beer-Lambert's law) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$I_t = I_0 \times 10^{-ccl}$$

ในขณะที่ค่าการส่องผ่านแสง (transmittance, T) หาได้จากสมการ

$$T = I_t / I_0$$

หรือในรูปร้อยละดังสมการ  $\%T = \frac{I_t}{I_0} \times 100$

และค่าการดูดกลืนแสง (absorbance, A) สามารถหาได้จากสมการ

$$A = \log(I_0 / I_t)$$

ดังนั้น  $A = -\log T = 2 - \log \%T$

หรือ  $A = \epsilon cl$

เมื่อ  $\epsilon$  คือ molar absorptivity หรือ absorption coefficient เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารและความยาวคลื่นที่วัดมีหน่วยเป็น  $\text{Lmole}^{-1}\text{cm}^{-1}$

- c คือ ความเข้มข้นของสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นหน่วย mole/L  
 l คือ ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่างหรือความหนาของสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

รังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน 2 แบบคือ แบบ  $n \rightarrow \pi^*$  เป็นการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนที่ไม่สร้างพันธะ (non-bonding electron) เช่น อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (unpaired electron) ในสารประกอบออกไซด์ ซัลไฟด์ ไนไตรต์ และ ฮาโลเจน จากสถานะพื้นไปยังพายสตาร์ออร์บิทัล ( $\pi^*$ -orbital) ซึ่งมีระดับพลังงานที่สูงกว่าหรืออยู่ในสถานะกระตุ้น และแบบ  $\pi \rightarrow \pi^*$  เป็นการเปลี่ยนสถานะของพายอิเล็กตรอน ( $\pi$ -electron) จากพายออร์บิทัล ( $\pi$ -orbital) ที่อยู่ในสถานะพื้นไปยังพายสตาร์ออร์บิทัล ( $\pi^*$ -orbital) ซึ่งจะพบในโมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลได้ หรือที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophore) และส่วนมากจะมีพันธะชนิดไม่อิ่มตัว (พันธะคู่หรือพันธะสาม) เช่น C=O C=C -N=N- และ -NO<sub>2</sub> เป็นต้น ระดับพลังงานของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูปที่ 2.16

### ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความยาวคลื่นสูงสุดและความเข้มของการดูดกลืนรังสี

(1) การคอนจูเกตของพันธะคู่ (conjugated double bond) ในสารประกอบที่พันธะคู่มีการคอนจูเกตกันมากจะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นสูงขึ้น เนื่องจากระดับพลังงานสถานะของอิเล็กตรอนเข้าใกล้กันมากขึ้น เป็นผลให้พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นมีค่าลดลงในขณะที่ความเข้มของการดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้น และถ้าพันธะคู่มีการคอนจูเกตกันมากๆ จนกระทั่งมีการดูดกลืนแสงช่วงวิสิเบิลก็จะส่งผลให้สารประกอบนั้นมีสี

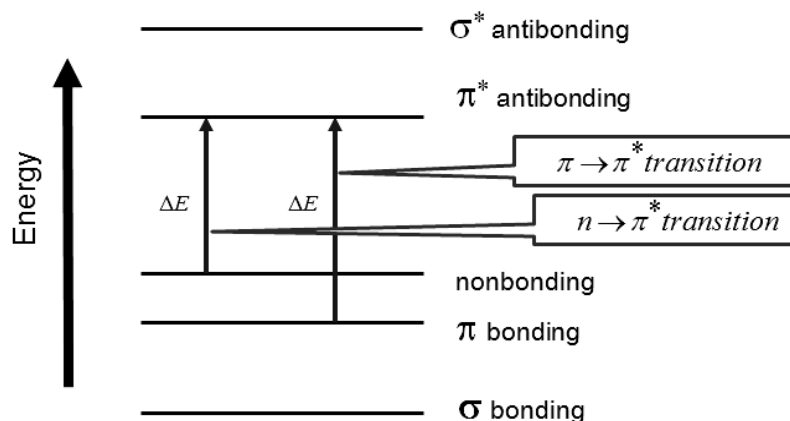
(2) อิทธิพลของหมู่ออกไซโครม (auxochrome) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีพันธะชนิดอิ่มตัว มีอิเล็กตรอนที่ไม่สร้างพันธะ และไม่ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มากกว่า 200 นาโนเมตร เช่น -OH -NH<sub>2</sub>-OCH<sub>3</sub>-Cl และ -Br เมื่อออกไซโครมมาสร้างพันธะกับโครโมฟอร์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนแบบ  $n \rightarrow \pi^*$  และส่งผลต่อสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโครโมฟอร์ดังนี้



- Bathochromic shift หรือ red shift เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น
- Hypsochromic shift หรือ blue shift เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง
- Hyperchromic shift เป็นปรากฏการณ์ที่ความเข้มของการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น
- Hypochromic shift เป็นปรากฏการณ์ที่ความเข้มของการดูดกลืนแสงลดลง

(3) การเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลหรือการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่แตกต่างกันของสารชนิดเดียวกันจะทำให้มี molar absorptivity ที่แตกต่างกัน

(4) อื่นๆ เช่น ตัวทำละลายที่มีสมบัติความเป็นขั้วต่างกัน อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของสารตัวอย่าง เป็นต้น



รูปที่ 2.16 ระดับพลังงานของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน <sup>[37]</sup>

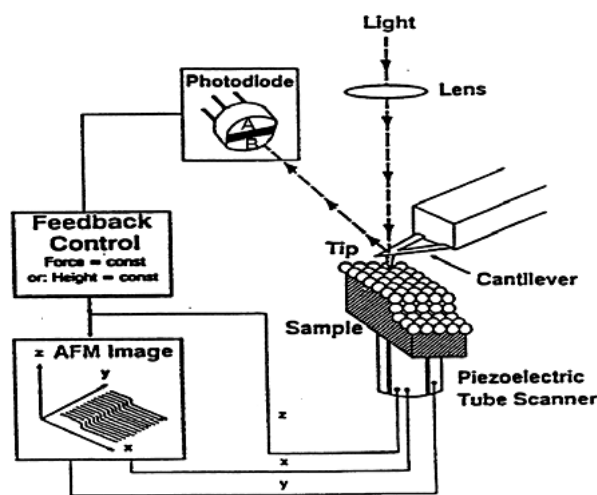
## 2.6.2 กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM) <sup>[39][47]</sup>

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM) เป็นเครื่องมือที่จัดอยู่ในกลุ่มของกล้องจุลทรรศน์ชนิดหัวอ่านส่องกราด (Scanning Probe Microscopy, SPM) นำมาใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของวัสดุในระดับนาโนเมตรโดยอาศัยหลักการของอันตรกิริยาของแรงระหว่างอะตอม (atomic force) ระหว่างส่วนปลายแหลมของคานายื่นกับพื้นผิวของวัสดุและจะทำการประมวลผลออกมาในลักษณะของภาพพื้นผิว กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมมีข้อดีคือ สามารถใช้ได้กับพื้นผิวของวัสดุหลายประเภททั้งที่เป็นฉนวนและที่นำไฟฟ้าได้

เช่น โลหะพอลิเมอร์ เซรามิก โมเลกุลทางชีวภาพ เป็นต้น และสามารถนำไปใช้ศึกษาลักษณะเชิงโครงสร้างของพื้นผิวในระดับอะตอมหรือโมเลกุล รวมทั้งขนาดและการจัดเรียงตัวได้

### หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีปลายแหลมเล็ก (tip) ขนาดเท่ากับ 1 อะตอม ทำจากวัสดุกลุ่มซิลิกอน เช่น Si Si<sub>3</sub>O<sub>4</sub> และ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ติดอยู่ที่ปลายของคานยื่น (cantilever) โดยมีหลักการพื้นฐานคือ มีการยิงแสงเลเซอร์ไปยังส่วนปลายแหลมของคานยื่นในระยะใกล้ เมื่อส่วนปลายแหลมของคานยื่นถูกลากให้เคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวของวัสดุ แรงกระทำระหว่างอะตอมที่ส่วนปลายแหลมกับอะตอมบนพื้นผิว เช่น แรงแวนเดอวาลส์ จะไปดึงคานทำให้คานเกิดการโก่งงอและเอียงด้วยมุมต่างๆ ตามลักษณะของพื้นผิวที่มีความสูงต่ำแตกต่างกัน โดยสามารถตรวจวัดขนาดของแรงเชิงปฏิสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ตำแหน่งของส่วนปลายแหลมและพื้นผิวของวัสดุได้ด้วยมุมสะท้อนของแสงเลเซอร์ที่สะท้อนมายังจุดรับแสง (photodiodes หรือ laser detector) จากนั้นคอมพิวเตอร์จะแปลงสัญญาณออกมาเป็นภาพของพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งในรูปแบบ 2 มิติ หรือ 3 มิติ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม <sup>[46]</sup>

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมมีโหมดการทำงานด้วยกัน 3 แบบ ซึ่งได้แก่

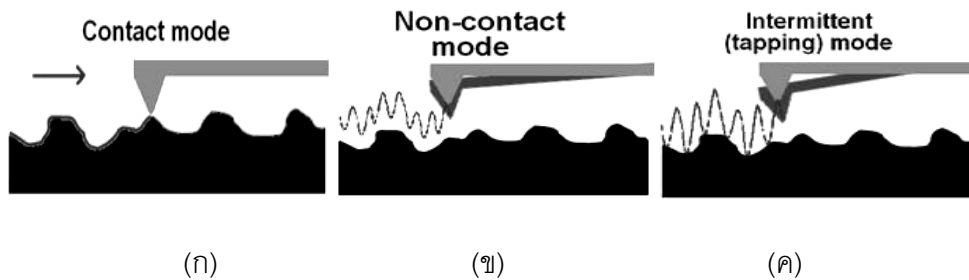
1. **แบบสัมผัส (contact mode หรือ static mode)** การทำงานของโหมดนี้ส่วนปลายแหลมของคานยื่นจะสัมผัสและถูกลากไปบนพื้นผิวของวัสดุตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.18 (ก) ทำให้

เหมาะสำหรับวัสดุที่มีพื้นผิวแข็ง เพราะถ้าหากใช้กับวัสดุที่มีพื้นผิวอ่อนจะทำให้ผิวหน้าของวัสดุนั้นถูกทำลายได้ นอกจากนี้ยังเหมาะกับการวิเคราะห์พื้นผิวในระดับอะตอม (atom scale) เนื่องจากส่วนปลายแหลมนั้นจะอยู่ติดกับพื้นผิว ทำให้ได้ภาพที่มีความละเอียดสูง โดยในโหมดนี้จะมีการเพิ่มหรือลดความต่างศักย์ที่ให้กับสารเพียโซอิเล็กทริกที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมระดับของคานเพื่อให้คานสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุ ดังนั้นจึงใช้ความต่างศักย์ที่เป็นตัวที่แสดงถึงลักษณะของพื้นผิว ข้อดีของโหมดนี้คือสามารถสแกนได้เร็ว แต่ก็มีข้อเสียคือจะทำให้เกิดแรงต้านในแนวของการเคลื่อนที่ที่ขนานกับพื้นผิวขึ้น ซึ่งอาจทำให้คานยื่นที่ใช้วัดนั้นเกิดการบิดเบี้ยวไป ส่งผลให้ข้อมูลความสูงของพื้นผิวที่วัดนั้นคลาดเคลื่อนได้ รวมทั้งยังมีข้อจำกัดคือ พื้นผิวของตัวอย่างต้องมีความสูงไม่เกิน 1 ไมครอน เนื่องจากการเคลื่อนที่ตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของส่วนปลายแหลมนั้น (scanner) ถูกจำกัด

**2. แบบไม่สัมผัส (non-contact mode)** การทำงานของโหมดนี้ส่วนปลายแหลมของคานยื่นจะไม่สัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุเลย ดังรูปที่ 2.18 (ข) จึงเหมาะสำหรับวัสดุที่มีพื้นผิวอ่อน โดยในขณะใช้งานส่วนปลายแหลมจะอยู่เหนือพื้นผิวของวัสดุเป็นระยะ 50-150 อังสตรอม และจะมีแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงดูระหว่างส่วนปลายแหลมของคานยื่นกับพื้นผิวของวัสดุเกิดขึ้น สามารถวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด เฟส รวมถึงความถี่ในการสั่นของคาน ข้อดีของโหมดนี้คือจะมีแรงกระทำระหว่างส่วนปลายแหลมของคานยื่นกับพื้นผิวของวัสดุน้อยมาก ทำให้ช่วยยืดอายุในการใช้งานของเข็ม แต่ก็มีข้อเสียคือ สำหรับการใช้งานที่ต้องการความละเอียดสูง การใช้โหมดนี้อาจเกิดการผิดพลาดขึ้นได้เนื่องจากโดยปกติแล้วพื้นผิวของวัสดุจะมีชั้นของน้ำและสารอื่นเคลือบอยู่ ซึ่งอาจจะมีผลต่อค่าแรงแวนเดอร์วาลส์ที่วัดได้ และไม่สามารถนำไปสแกนวัสดุที่อยู่ในของเหลวได้

**3. แบบกึ่งสัมผัส (tapping mode หรือ intermittent mode)** การทำงานของโหมดนี้ส่วนปลายแหลมของคานยื่นจะสัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุเป็นระยะเวลาดังนั้น ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวดังรูปที่ 2.18 (ค) ทำให้สามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากแรงต้านและไฟฟ้าสถิตย์ได้ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง โดยจะมีการวางส่วนปลายแหลมให้สัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุเพื่อให้ได้ภาพที่มีความละเอียดสูง และมีการยกส่วนปลายแหลมขึ้นเพื่อทำการเลื่อนตำแหน่ง ในโหมดนี้คานยื่นจะสั่นด้วยความถี่ 50,000 – 500,000 รอบต่อวินาที ดังนั้นจึงใช้การเปลี่ยนแปลงของค่าแอมพลิจูดเป็นตัวที่แสดงถึงลักษณะของพื้นผิว โดยเมื่อส่วนปลายแหลมไม่ได้สัมผัสกับพื้นผิวของวัสดุ คานยื่นก็จะสั่นด้วยแอมพลิจูดสูง ในขณะที่เมื่อส่วนปลายแหลมเกิดการสัมผัสกับพื้นผิวของ

วัสดุจะทำให้ค่าแอมพลิจูดของการสั่นนั้นลดลง ข้อดีของโหมดนี้คือไม่ทำให้พื้นผิวของวัสดุเสียหาย และสามารถดูความสูงต่ำของภาพรวมทั้งความแตกต่างของเฟสได้



รูปที่ 2.18 โหมดการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (ก) แบบสัมผัส (contact mode) (ข) แบบไม่สัมผัส (non-contact) (ค) แบบกึ่งสัมผัส (tapping mode หรือ intermittent mode) <sup>[47]</sup>

### 2.6.3 โฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (Photoluminescence spectroscopy) <sup>[48]-[55]</sup>

โฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของสารโดยอาศัยกระบวนการเปล่งแสงที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารถูกกระตุ้นด้วยการดูดกลืนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุลจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) ที่มีพลังงานสูงกว่า จากนั้นอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะเกิดการผ่อนคลายแล้วกลับสู่สถานะพื้นเดิม โดยจะคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของโฟตอนพลังงานต่ำหรือแสงที่ตามองเห็นได้ (photon emission) ซึ่งจะเป็นค่าจำเพาะของสารแต่ละชนิด โฟโตลูมิเนสเซนซ์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) หรือการวาวแสง และฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescence) หรือการเรืองแสง โดยฟลูออเรสเซนซ์จะเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าฟอสฟอเรสเซนซ์ ซึ่งโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นภายใน  $10^{-5}$  วินาทีหลังจากถูกกระตุ้นหรือเกิดในช่วงการให้พลังงานในการกระตุ้นเกือบทันที ส่วนฟอสฟอเรสเซนซ์จะใช้เวลาในการเกิดมากเป็นนาที่หรือชั่วโมงหลังจากถูกกระตุ้นหรือเกิดในช่วงหลังจากการให้พลังงานในการกระตุ้นไปแล้ว ข้อดีของเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปีเมื่อเทียบกับเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีคือมีความไวสูงกว่า 1-3 เท่า มีลักษณะเฉพาะ และสามารถวิเคราะห์ได้ในช่วงความเข้มข้นกว้าง อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ยังใช้กันไม่กว้างขวางนัก เนื่องจากระบบทางเคมีที่ทำให้เกิดการเปล่งแสงนั้นมีจำกัด

## หลักการของโฟโตลูมิเนสเซนซ์

โฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นกระบวนการที่มีทั้งการดูดกลืนแสงเพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนขึ้นไปยังสภาวะกระตุ้นและการเปล่งหรือคายแสงเมื่ออิเล็กตรอนกลับสู่สภาวะพื้น ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นจะต้องมีการแข่งขันกัน ดังนั้นอัตราการเกิดของกระบวนการเหล่านี้จึงมีความสำคัญ

### (1) กระบวนการกระตุ้น (Excitation)

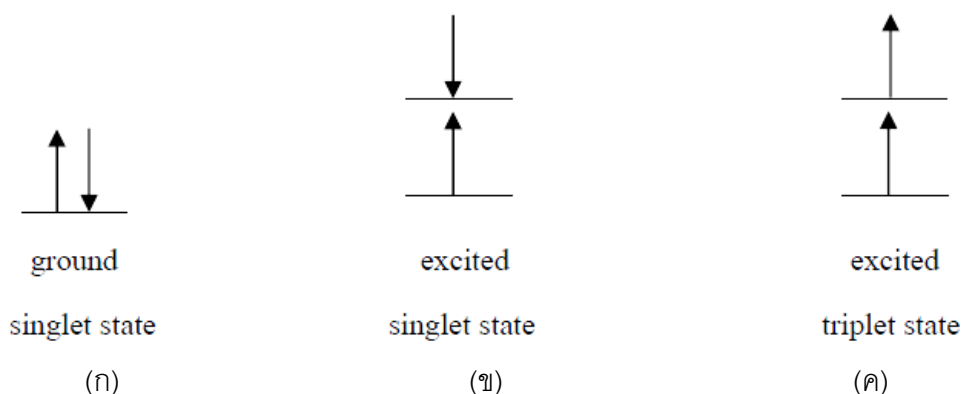
เมื่ออิเล็กตรอนดูดกลืนแสงและถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปยังสภาวะกระตุ้นซึ่งทำให้ตัวอิเล็กตรอนนั้นไม่เสถียร ดังนั้นจึงต้องมีกลไกที่ช่วยลดพลังงานให้อิเล็กตรอนกลับลงมาสู่สภาวะพื้น

จากสมการ  $M = 2S + 1$  ตามกฎของ Hund (Hund's rule)

เมื่อ  $M$  คือ multiplicity ของโมเลกุล ซึ่งแสดงถึง orbital angular momentum ของแต่ละสภาวะ (state) และ  $S$  คือ spin quantum number ของโมเลกุล ซึ่งเป็นผลรวมของ spin ของอิเล็กตรอนในโมเลกุล สำหรับโมเลกุลของสารอินทรีย์ส่วนใหญ่  $S$  จะมีค่าเท่ากับ 0 เพราะโมเลกุลมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ ดังนั้นสภาวะที่มีพลังงานต่ำสุดหรือสภาวะพื้น อิเล็กตรอนจะต้องอยู่เป็นคู่โดยมี spin ในทิศตรงกันข้ามกัน ดังสมการ  $S = (+1/2 - 1/2) = 0$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$M = 2(0) + 1 = 1 \quad \text{เรียกว่า singlet state}$$

โดยให้  $S_0$  เป็น singlet state ที่อยู่ในสภาวะพื้น ในขณะที่  $S_1$  และ  $S_2$  เป็น singlet state ที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นลำดับที่ 1 และลำดับที่ 2 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.19 (ก) และ (ข)



รูปที่ 2.19 (ก) singlet state ในสภาวะพื้น (ข) singlet state ในสภาวะกระตุ้น และ (ค) triplet state ในสภาวะกระตุ้น <sup>[49], [52]</sup>

ขณะที่โมเลกุลอยู่ในสภาวะกระตุ้น อิเล็กตรอนตัวหนึ่งมีโอกาสที่จะเปลี่ยน spin กลับทาง ดังรูปที่ 2.19 (ค) ดังนี้

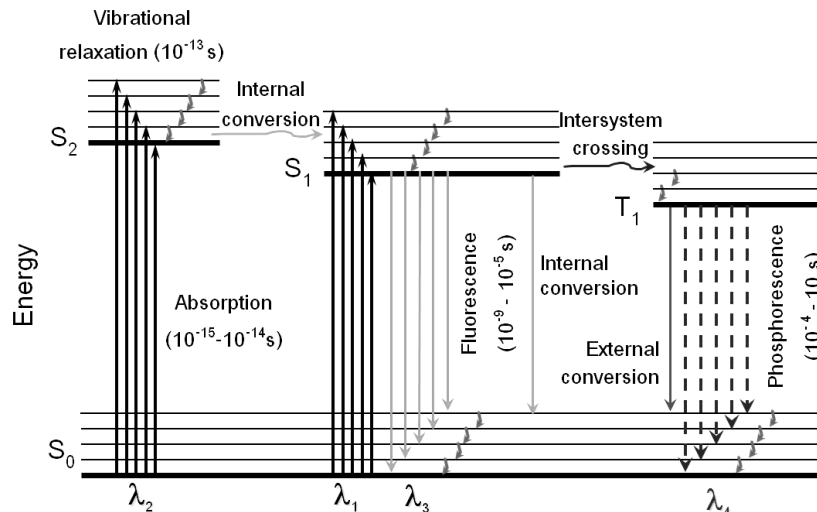
$$S = + 1/2 + 1/2 = 1$$

จะได้ว่า  $M = (2 \times 1) + 1 = 3$  เรียกว่า triplet state

โดยให้  $T_1$  เป็น triplet state ที่มีพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งจากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่า โมเลกุลที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่จะไม่มี triple state ที่สภาวะพื้น

## (2) กระบวนการลดระดับพลังงาน (Deexcitation)

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นไปยังสภาวะกระตุ้น เช่น ที่สภาวะกระตุ้น  $S_2$  การที่โมเลกุลจะกลับลงมายังสภาวะพื้นได้นั้นจะต้องมีกลไกต่างๆ หลายขั้นตอน ยกตัวอย่างเช่น ถ้าโมเลกุลอยู่ในสภาวะกระตุ้น โมเลกุลสามารถลด vibrational energy ที่เกินให้ลดลงได้ด้วยการชนกับโมเลกุลของตัวทำละลายโดยผ่านกระบวนการที่เรียกว่า vibrational relaxation ซึ่งจะช่วยให้ตัวทำละลายมีอุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่เดียวกันระดับพลังงาน vibrational energy ที่ต่ำของโมเลกุลที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น  $S_2$  ก็ลดต่ำลงจนมาอยู่ในระดับเดียวกันกับระดับพลังงาน vibrational energy ที่สูงของ  $S_1$  เรียกกระบวนการนี้ว่า internal conversion ซึ่งกระบวนการลดพลังงานของทั้ง vibrational relaxation และ internal conversion จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหรือประมาณ  $10^{-12}$  วินาที จากนั้นโมเลกุลจะลงสู่สภาวะกระตุ้น  $S_1$  ที่มีระดับพลังงานต่ำโดยไม่มีการแผ่รังสี และจะเกิดกระบวนการลดพลังงานไปสู่สภาวะพื้น  $S_0$  โดยจะมีการปลดปล่อยโฟตอนหรือเปล่งแสงออกมาด้วย เรียกว่า กระบวนการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) ซึ่งเกิดขึ้นรวดเร็วมาก (ประมาณ  $10^{-9}$  -  $10^{-5}$  วินาที) สำหรับในกรณีที่โมเลกุลอยู่ในสภาวะกระตุ้น อิเล็กตรอนตัวหนึ่งอาจเกิด spin กลับทางได้ ทำให้ค่า multiplicity เท่ากับ 3 โมเลกุลนั้นจะเปลี่ยนจากสภาวะกระตุ้น  $S_1$  ไปเป็น triplet state ที่มีพลังงานต่ำหรือ  $T_1$  เรียกกระบวนการนี้ว่า intersystem crossing ซึ่งจะไม่มี การแผ่รังสีออกมา จากนั้นจะเกิดกระบวนการลดระดับพลังงานจาก  $T_1$  ไปยัง  $S_0$  โดยมีการคายโฟตอนออกมาด้วย เรียกว่า กระบวนการเกิดฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence) และจะใช้เวลานานกว่าฟลูออเรสเซนซ์ ประมาณ  $10^{-3}$  -  $10$  วินาที ดังนั้นจึงทำให้เราสามารถเห็นการเรืองแสงของสารตัวอย่างได้หลังจากทำให้เกิดสถานะกระตุ้นแล้ว ทั้งนี้ต้องอยู่ที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น ซึ่งกระบวนการกระตุ้นและกระบวนการลดระดับพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ระดับพลังงาน Perrin-Jablonski ของการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสง [52]

### การเกิดฟลูออเรสเซนซ์ของโมเลกุล (Molecular fluorescence spectroscopy)

การเกิดฟลูออเรสเซนซ์ของโมเลกุลทำได้โดยการกระตุ้นสารตัวอย่างด้วยรังสีที่มีความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน เรียกว่า absorption หรือ excitation wavelength และวัดแสงที่เปล่งออกมาที่มีความยาวคลื่นซึ่งเรียกว่า emission wavelength โดยที่แถบฟลูออเรสเซนซ์ของโมเลกุลส่วนใหญ่จะประกอบด้วย lines ที่มีความยาวคลื่นมากกว่าความยาวคลื่นของแสงที่ถูกดูดกลืน เพื่อให้เกิดการกระตุ้น เรียกว่าการเคลื่อนที่ของความยาวคลื่นนี้ว่า Stokes shift และถ้าผลต่างของ vibrational energy ทั้งในสถานะพื้นและสถานะกระตุ้นมีค่าใกล้เคียงกัน สเปกตรัมการดูดกลืนหรือสเปกตรัมการกระตุ้นและสเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์จะมีลักษณะเป็นภาพกระจกสะท้อน (mirror images) ของกันและกัน และซ้อนกันที่ความยาวคลื่นที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานระหว่าง vibrational energy ของ  $S_1$  กับ vibrational energy ของ  $S_0$

จะเห็นได้ว่าฟลูออเรสเซนซ์เป็นกระบวนการหนึ่งในหลายกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลกลับสู่สถานะพื้นหลังจากถูกกระตุ้นโดยการดูดกลืนแสง โมเลกุลที่ดูดกลืนแสงได้ทุกชนิดจึงมีโอกาที่จะให้ฟลูออเรสเซนซ์ได้ แต่โมเลกุลส่วนใหญ่จะไม่ให้ฟลูออเรสเซนซ์เนื่องจากโครงสร้างของโมเลกุลเหล่านี้ทำให้เกิดการผ่อนคลายที่ไม่มีการแผ่รังสี (nonradiative relaxation) เกิดขึ้นด้วยอัตราที่สูงกว่าการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนส์ โดยโมเลกุลจะมีประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (quantum efficiency) ในการให้ฟลูออเรสเซนซ์มาน้อยเพียงใด อธิบายได้ด้วยผลได้เชิงควอนตัม (quantum yield) ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{Quantum yield } (\phi_F) &= \text{จำนวนโมเลกุลที่ให้ฟลูออเรสเซนซ์/จำนวนโมเลกุลที่ถูกกระตุ้น} \\ &= \text{จำนวนโฟตอนที่ถูกคายออกมา/จำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืน} \\ &= \frac{k_F}{k_F + k_{nr}} \end{aligned}$$

เมื่อ  $k_F$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของ fluorescence relaxation  
 $k_{nr}$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของ nonradiative relaxation

โดยโมเลกุลที่ให้ฟลูออเรสเซนซ์ได้ดีจะมี quantum yield ใกล้เคียง 1 ในขณะที่โมเลกุลที่ไม่ให้ฟลูออเรสเซนซ์จะมี quantum yield เท่ากับ 0 ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อการให้ฟลูออเรสเซนซ์และ quantum yield ได้แก่

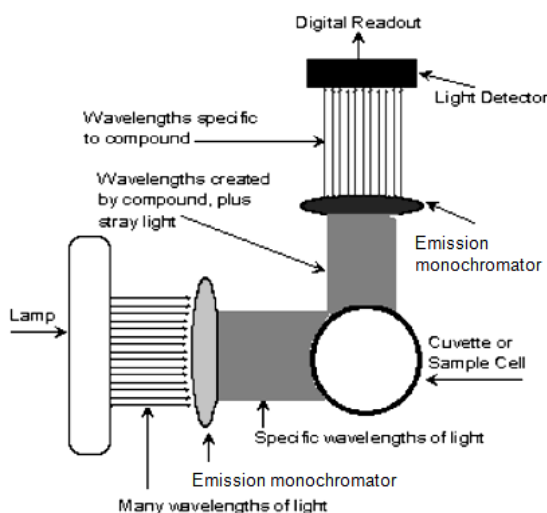
- โครงสร้างของโมเลกุล โดยสารประกอบที่มีวงแหวนอะโรมาติกและพันธะคู่ที่เกิดการคอนจูเกตกันส่วนใหญ่จะให้ฟลูออเรสเซนซ์ได้
- สารประกอบที่มีโมเลกุลยึดเกาะกันแน่นจะให้ฟลูออเรสเซนซ์ได้ดี เนื่องจากความแน่น (rigidity) จะลดอัตราการเกิด nonradiative relaxation ลงจนถึงจุดที่เกิดการผ่อนคลายโดยฟลูออเรสเซนซ์
- ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ความถี่ของการชนกันของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิด nonradiative relaxation มากขึ้น และ quantum efficiency ของฟลูออเรสเซนซ์ลดลง
- quantum efficiency ของฟลูออเรสเซนซ์จะลดลง เมื่อความหนืดของตัวทำละลายลดลง เนื่องจากความถี่ของการชนกันของโมเลกุลเพิ่มขึ้น ทำให้เกิด nonradiative relaxation ได้มากขึ้น เป็นต้น

### หลักการการทำงานของเครื่องลูมิเนสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์

เครื่องลูมิเนสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (Luminescence spectrometer) หรือเครื่องสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ (Spectrofluorometer) โดยทั่วไปจะใช้ลำแสงคู่ (double beam) เพื่อหักล้างการเปลี่ยนแปลงกำลังของแหล่งกำเนิดเมื่อผ่านแสงไปยังสารตัวอย่าง โดยมีหลักการทำงานดังนี้ แสงจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ผ่าน primary excitation monochromator เพื่อคัดเลือกแสงที่มีความยาวคลื่นสำหรับใช้กระตุ้นโมเลกุลของสารตัวอย่าง และปิดกั้นหรือแยกแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับฟลูออเรสเซนซ์ออกไป จากนั้นแสงจะผ่านและกระตุ้นสารตัวอย่าง ทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ใน



โมเลกุลของสารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น และจะคายโฟตอนหรือเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่นอีกค่าหนึ่งออกมาเมื่อเกิดการผ่อนคลาย แสงที่เปล่งออกมาจะผ่าน secondary emission monochromator เพื่อคัดเลือกแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับฟลูออเรสเซนซ์แล้วส่งผ่านไปยังตัวตรวจวัด สุดท้ายแสงที่ผ่านออกมาจะถูกตรวจวัดในทิศทางตั้งฉากกับแสงจากแหล่งกำเนิดและประมวลผลออกมาเป็นสเปกตรัมของการคายแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ดังรูปที่ 2.21 การจัดวางเครื่องมือในเครื่องลูมิเนสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์จะจัดวางให้ primary excitation monochromator ตั้งฉากกับ secondary emission monochromator เสมอเพื่อป้องกันไม่ให้มีแสงจากแหล่งกำเนิดไปตกกระทบที่ตัวตรวจวัด เพราะต้องการวัดเฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับฟลูออเรสเซนซ์ที่สารตัวอย่างคายออกมาเท่านั้น



รูปที่ 2.21 หลักการทำงานของเครื่องลูมิเนสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ [55]

#### 2.6.4 อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared (IR) spectroscopy) [56]-[59]

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared (IR) spectroscopy) เป็นเทคนิคที่นำรังสีอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สาร หาสูตรโครงสร้าง หรือหาปริมาณของสาร โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงอินฟราเรดในช่วงความถี่ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของพันธะในโมเลกุล เช่น การสั่น (vibration) และการหมุน (rotation) เป็นต้น โดยพันธะต่างๆ จะมีการสั่นที่มีความถี่ต่างกันและเป็นค่าเฉพาะทำให้สามารถบอกชนิดของพันธะและหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในโมเลกุลได้ (ภาคผนวก ก)

การบอกตำแหน่งของแถบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดสามารถบอกได้หลายหน่วย เช่น ความถี่ (frequency,  $\nu$ ) ความยาวคลื่น (wavelength,  $\lambda$ ) และเลขคลื่น (wavenumber,  $\bar{\nu}$ ) หรือจำนวนคลื่นต่อระยะทาง 1 เซนติเมตร (มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$\bar{\nu}(\text{cm}^{-1}) = \frac{10^4}{\lambda(\mu\text{m})}$$

$$\nu = c\lambda$$

เมื่อ  $c$  คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที และเนื่องจากเลขคลื่นเป็นจำนวนคลื่นใน 1 หน่วยระยะทาง ส่วนความถี่เป็นจำนวนคลื่นใน 1 หน่วยเวลา ดังนั้นจึงอาจพบว่ามีการใช้เลขคลื่นว่าความถี่ได้เช่นกัน

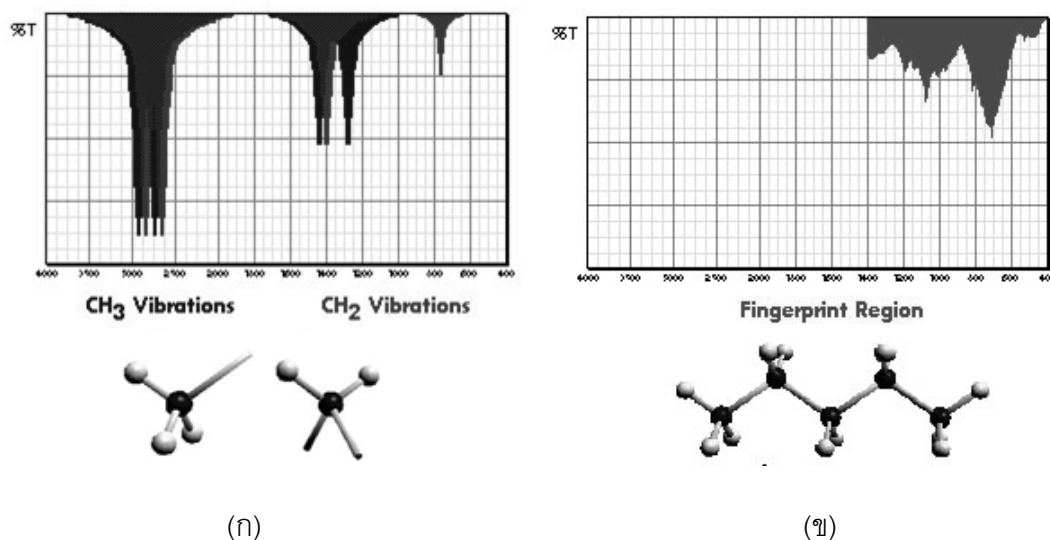
รังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วงได้แก่

(1) Near IR region อยู่ในช่วง  $12,800 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$  หรือถัดจากช่วงรังสีวิสิเบิล ให้การดูดกลืนแบบ weak absorption band ใช้ประโยชน์ในการทำปริมาณวิเคราะห์ของหมู่ฟังก์ชันและศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลจำพวกอะโรมาติก

(2) Middle IR region อยู่ในช่วง  $4,000 - 200 \text{ cm}^{-1}$  แบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ

- บริเวณหมู่ฟังก์ชัน (functional group region) อยู่ในช่วง  $4,000 - 1,400 \text{ cm}^{-1}$  แถบการดูดกลืนรังสีในช่วงนี้เป็นแถบที่เกิดจากการสั่นแบบยืดของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญต่างๆ เช่น O-H C-H C=C เป็นต้น
- บริเวณรอยนิ้วมือ (fingerprint region) อยู่ในช่วง  $1,400 - 600 \text{ cm}^{-1}$  เป็นบริเวณที่มีแถบการดูดกลืนรังสีที่ซับซ้อนและเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด จึงใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารได้ เช่น สารคนละตัวแต่มีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกัน อินฟราเรดสเปกตรัมที่ได้บริเวณหมู่ฟังก์ชันจะเหมือนกันแต่บริเวณรอยนิ้วมือจะต่างกัน ดังรูปที่ 2.22

(3) Far IR region อยู่ในช่วง  $200 - 10 \text{ cm}^{-1}$  แถบการดูดกลืนรังสีในช่วงนี้มักเกิดจากการสั่นหรือการหมุนของโครงสร้างของโมเลกุล จึงไม่ค่อยได้ใช้ในการวิเคราะห์

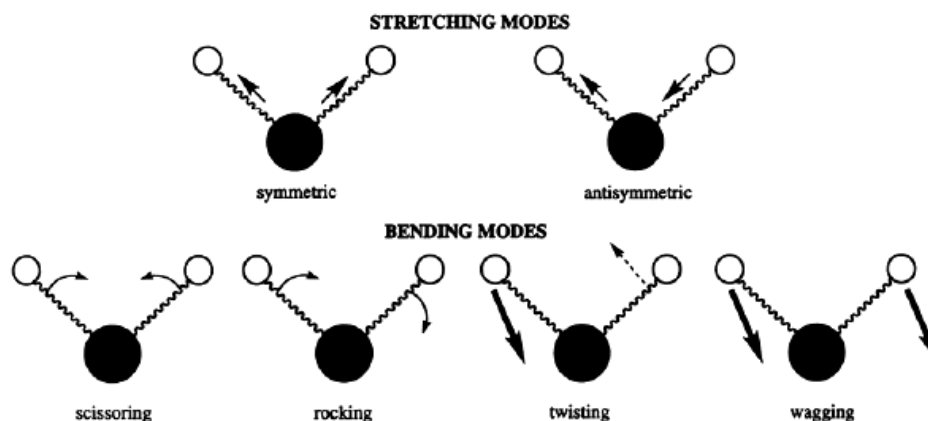


รูปที่ 2.22 อินฟราเรดสเปกตรัมที่เกิดขึ้น (ก) บริเวณหมู่ฟังก์ชัน และ (ข) บริเวณรอยนิ้วมือ [58]

ช่วงอินฟราเรดที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับสารอินทรีย์คือช่วงความถี่ระหว่าง  $4,000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$  หรือความยาวคลื่นระหว่าง  $2.5\text{--}15\text{ ไมโครเมตร}$  ซึ่งจะมีค่าเท่ากับพลังงานประมาณ  $2\text{--}10\text{ กิโลแคลอรีต่อโมล}$  พลังงานดังกล่าวจะก่อให้เกิดการสั่นของพันธะในโมเลกุล ซึ่งการสั่นแบบพื้นฐานมีด้วยกัน 2 ลักษณะคือ

- **แบบยืด (stretching)** เกิดจากพันธะที่ยึดอะตอมอยู่ยึดต่อกันหรือหดสั้นเข้าตามแนวแกนของพันธะ การสั่นแบบยืดมี 2 แบบคือ การยืดแบบสมมาตร (symmetric stretching) และการยืดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) โดยพลังงานที่ทำให้เกิดการยืดแบบไม่สมมาตรจะสูงกว่าการยืดแบบสมมาตร
- **แบบงอ (bending)** เป็นการสั่นแบบเปลี่ยนมุมของพันธะ ทำให้ตำแหน่งของอะตอมเปลี่ยนไปจากแนวแกนเดิมของพันธะ การสั่นแบบงอมี 4 แบบคือ
  - การงอแบบกรรไกร (scissoring) คือ สองอะตอมที่ต่อกับอะตอมกลางแกว่งไปด้านข้างในระนาบของโมเลกุล (in plane bending)
  - การโคลง (rocking) คือ สองอะตอมที่ต่อกับอะตอมกลางเคลื่อนที่เข้าหากันหรือออกจากกันในระนาบของโมเลกุล (in plane bending)
  - การบิด (twisting) คือ สองอะตอมที่ต่อกับอะตอมกลางแกว่งไปข้างหน้าและข้างหลังนอกระนาบของโมเลกุล (out of plane bending)

- การกระดิก (wagging) คือ สองอะตอมที่ต่อกับอะตอมกลางหมุนรอบพันธะนอกระนาบของโมเลกุล (out of plane bending) ดังรูปที่ 2.23



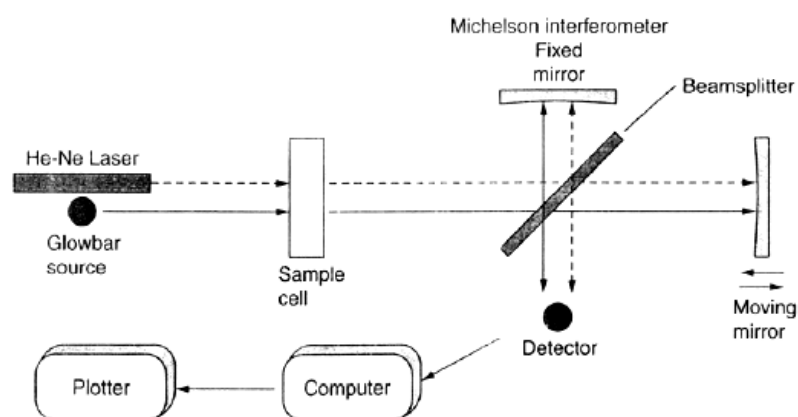
รูปที่ 2.23 รูปแบบการสั่นของพันธะ [59]

การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะ และการสั่นของพันธะที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) เท่านั้นที่จะทำให้เกิดพีคหรือแถบการดูดกลืนรังสีในอินฟราเรดสเปกตรัมได้ โดยแถบการดูดกลืนรังสีที่เกิดจากการสั่นแบบพื้นฐานจะเรียกว่าแถบพื้นฐาน นอกจากนี้การสั่นของพันธะยังมีแบบที่ซับซ้อนซึ่งทำให้เกิดแถบการดูดกลืนรังสีแบบอื่นๆ อีก เช่น แถบ overtone เป็นแถบที่มีความเข้มต่ำเกิดที่ความถี่ 2 เท่า 3 เท่า หรือ 4 เท่าของแถบพื้นฐาน จะเกิดเมื่อความถี่พื้นฐานมีความเข้มสูง แถบที่มีความถี่เป็นผลบวกของแถบพื้นฐาน 2 แถบขึ้นไป เรียกว่าแถบ combination ซึ่งถ้าแถบ overtone หรือแถบ combination เกิดในตำแหน่งใกล้เคียงกับแถบพื้นฐาน จะส่งผลให้ความเข้มของแถบพื้นฐานลดลง แต่ความเข้มของแถบ overtone หรือแถบ combination จะสูงขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการเกิด Fermi resonance และพีคทั้งคู่บางครั้งเรียกว่า Fermi doublet

**หลักการทำงานของเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectrometer)**

FT-IR นำเอาหลักการของ Michelson Interferometer มาใช้แทนอุปกรณ์กระจายแสง (monochromator) ในเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้ระบบกระจายแสง (Dispersive infrared spectrophotometer) โดยมีหลักการดังนี้ รังสีอินฟราเรดจากแหล่งกำเนิดถูกฉายไปยัง

สารตัวอย่าง โมเลกุลของสารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะในโมเลกุลเอาไว้ทำให้โมเลกุลถูกกระตุ้น ซึ่งการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนี้จะมีลักษณะคล้ายกับการดูดกลืนรังสีในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล แต่รังสีอินฟราเรดจะมีค่าพลังงานที่น้อยกว่า ดังนั้นโมเลกุลจะถูกกระตุ้นให้เกิดการสั่นหรือการหมุนเท่านั้น จากนั้นรังสีที่ผ่านสารตัวอย่างออกมาจะผ่านไปยังอุปกรณ์แยกลำรังสี (beam splitter) ซึ่งจะแยกรังสีครึ่งหนึ่งไปยังกระจกที่หมุนได้ (moving mirror) และสะท้อนรังสีอีกครึ่งหนึ่งไปยังกระจกที่ยึดกับที่ (fixed mirror) หรือเรียกว่า Michelson Interferometer ดังรูปที่ 2.24 ต่อมารังสีจะสะท้อนจากกระจกกลับมารวมกันที่อุปกรณ์แยกลำรังสีทำให้เกิดการแทรกสอดขึ้นและส่งผ่านไปยังตัวตรวจวัด โดยตัวตรวจวัดจะวัดค่าความเข้มของแสงที่จำนวนคลื่นต่างๆ อย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา (time-domain spectrum) แล้วคำนวณออกมาเป็น frequency-domain spectrum ด้วยสูตรทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า Fourier transformation สุดท้ายเครื่องจะประมวลผลออกมาเป็นกราฟระหว่างร้อยละของแสงที่ผ่านตัวอย่างออกมา (percent transmittance, %T) หรือปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืน (absorbance) (แกน Y) กับเลขคลื่นหรือความถี่ (แกน X) ได้เป็นอินฟราเรดสเปกตรัม เครื่อง FT-IR มีข้อดีคือให้ผลวิเคราะห์ที่รวดเร็ว เพราะจะวัดค่าความเข้มแสงที่จำนวนคลื่นต่างๆ อย่างต่อเนื่องในเวลาพร้อมกันทั้งหมด มีค่าสัญญาณต่อคลื่นรบกวน (signal-to-noise, s/n) สูง ทำให้ได้สเปกตรัมที่มีความละเอียดและชัดเจน ได้ความถี่ที่ถูกต้องแม่นยำเพราะเทียบมาตรฐานจากพีคของ He-Ne laser แต่มีข้อเสียคือมีราคาแพง

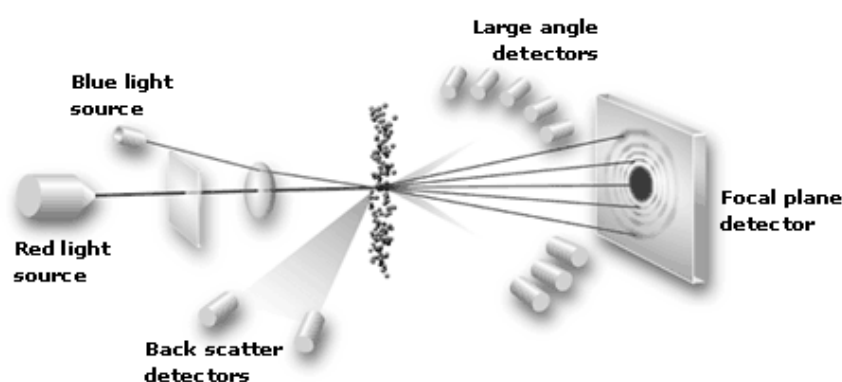


รูปที่ 2.24 Michelson interferometer ใน FT-IR สเปกโทรมิเตอร์<sup>[59]</sup>

**การเตรียมตัวอย่าง** ตัวอย่างที่เป็นผงหรือของแข็งนิยมเตรียมตัวอย่างแบบ Press disc โดยบดตัวอย่าง 0.5-1.0 มิลลิกรัม ให้เข้ากับผง KBr หรือ KCl ที่ผลิตขึ้นมาสำหรับการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคคอปราเรต แล้วนำไปอัดให้เป็นแผ่น ซึ่งจะต้องระวังเรื่องความชื้นเนื่องจากผงเกลือทั้งสองชนิดนี้สามารถดูดความชื้นได้ดี

## 2.6.5 การวัดการกระเจิงแสง (Laser light scattering) <sup>[30], [60]-[64]</sup>

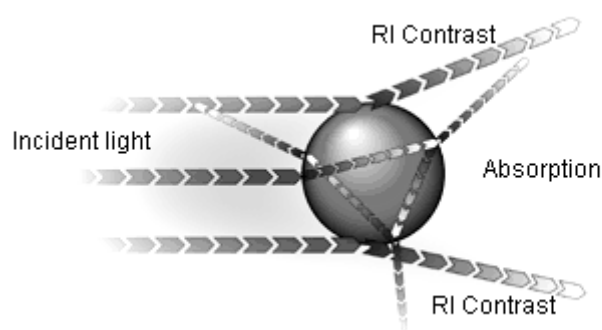
เทคนิคการวัดการกระเจิงแสงหรือเรียกอีกอย่างว่า เทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนของแสง (Laser light diffraction) มีหลักการพื้นฐานคือเมื่อลำแสงเดินทางผ่านอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะทำให้เกิดการกระเจิงของลำแสงไปในมุมต่างๆ โดยรูปแบบการกระเจิงแสงที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาณของอนุภาค ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังตัวตรวจวัดและประมวลผลเป็นการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 หลักการของเทคนิคการวัดการกระเจิงแสง <sup>[62]</sup>

ในการวัดการกระเจิงแสง การกระจายตัวของขนาดอนุภาคสามารถคำนวณได้จาก การเปรียบเทียบรูปแบบการกระเจิงแสงที่วัดได้กับทฤษฎีทางแสงซึ่งได้แก่ สมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer approximation) ซึ่งกล่าวไว้ว่า ความเข้มของแสงที่เกิดการกระเจิงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาด ในขณะที่มุมของลำแสงที่เกิดการกระเจิงจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่มุมที่วัดได้จะแคบ แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กมุมที่วัดได้ก็จะกว้าง อย่างไรก็ตามสมมติฐานนี้มีข้อจำกัดคือ อนุภาคต้องมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นของแสงที่ใช้วัด (มากกว่า 50 ไมครอน) อนุภาคต้องทึบแสง อนุภาคทุกขนาดต้องกระเจิงแสงออกไปอย่างมีประสิทธิภาพเท่ากัน และค่าดัชนีหักเหของอนุภาคกับตัวกลางจะต้องมีค่าต่างกัน

มาก จากข้อจำกัดเหล่านี้จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสง อนุภาคที่โปร่งใส (transparent) หรือมีค่าการดูดกลืนแสงต่ำ (absorbance น้อยกว่า 0.2) รวมทั้งอนุภาคที่กระจายตัวในตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกันได้ ต่อมาจึงได้มีการใช้ทฤษฎีของมี (Mie's theory) ซึ่งมีหลักการพื้นฐานเช่นเดียวกับสมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ แต่มีการแก้ไขโดยนำค่าดัชนีหักเหและค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคที่นำมาทดสอบรวมทั้งตัวกลางมาใช้ในการคำนวณด้วย เพื่อให้สามารถวัดอนุภาคได้ทุกประเภททั้งที่บดแสงและโปร่งใส รวมทั้งอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอนได้อย่างถูกต้อง ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ทฤษฎีของมี (Mie's theory) <sup>[62]</sup>

## 2.6.6 การวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน (Thermo Gravimetric Analysis, TGA) <sup>[65]-[67]</sup>

การวิเคราะห์ภายใต้ความร้อนเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิภายใต้บรรยากาศที่กำหนด โดยในการวิเคราะห์ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในเตาสามารถกำหนดเองได้ซึ่งอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจนหรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศหรือออกซิเจน ในระหว่างการวิเคราะห์อุณหภูมิของตัวอย่างจะถูกทำให้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกเป็นเทอร์โมแกรมที่แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างกับอุณหภูมิ โดยน้ำหนักที่หายไปอาจเกิดจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน การตกผลึกที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟส เป็นต้น โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิดทำให้สามารถระบุองค์ประกอบของสารได้ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงสามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

### 2.6.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission electron microscopy, TEM) <sup>[45]</sup>

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ใช้สำหรับศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของวัสดุ เช่น โครงสร้างของผลึก การกระจายตัวของอนุภาค ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ รอยแตกของวัสดุ เป็นต้น โดยกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะใช้ลำอิเล็กตรอนในการส่องผ่านตัวอย่างแทนการใช้แสง ทำให้ได้ภาพที่ละเอียดกว่ากล้องจุลทรรศน์ชนิดอื่นๆ และสามารถใช้ศึกษาได้ถึงระดับนาโน ทั้งนี้เนื่องจากอิเล็กตรอนมีความยาวคลื่นที่สั้นกว่าแสง ดังนั้นจึงมีพลังงานในการทะลุผ่านตัวอย่างที่สูงกว่า หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่านมีดังนี้ กลุ่มอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและเคลื่อนที่ผ่าน electromagnetic lens กลายเป็นลำอิเล็กตรอนขนาดเล็ก จากนั้นลำอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างไป ส่งผลให้อิเล็กตรอนบางส่วนเกิดการกระเจิง (scattering) สะท้อน (diffraction) หรือถูกดูดซับ (absorbed) ส่วนอิเล็กตรอนที่เหลือที่ทะลุผ่านมาได้จะวิ่งไปชน fluorescent screen ที่อยู่ส่วนล่างของกล้อง ทำให้เกิดเป็นภาพ 2 มิติซึ่งเป็นภาพขาวดำ (shadow image) ขึ้น โดยภาพที่ได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของลำอิเล็กตรอน หลังจากผ่านตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ diffraction pattern เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมของลำอิเล็กตรอนเนื่องจากอิเล็กตรอนเกิดการกระเจิงหรือสะท้อนไปในมุมต่างๆ ภาพที่ได้จะมีลักษณะเป็นจุดๆ สามารถบอกระนาบผลึกและระยะห่างระหว่าง lattice ได้ dark-field image และ bright-field image เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มหรือความหนาแน่นของลำอิเล็กตรอน ภาพที่ได้จะมีบริเวณเข้มอ่อนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุ โดยบริเวณเข้มคือบริเวณของวัสดุที่มีความหนาแน่นหรือเลขอะตอมมากกว่า ในขณะที่บริเวณที่มีสีอ่อนกว่าจะเป็นบริเวณของวัสดุที่มีความหนาแน่นหรือเลขอะตอมต่ำกว่า ภาพที่ได้สามารถบอกถึงลักษณะรูปร่างและขนาดของตัวอย่างได้ ซึ่งเราสามารถศึกษาภาพได้โดยตรงจากการดูผ่านกล้องจุลทรรศน์หรือจากกล้องถ่ายภาพ

**การเตรียมตัวอย่าง** ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่างและข้อมูลที่ต้องการ โดยจะต้องเตรียมตัวอย่างให้บางหรือมีความหนาไม่เกิน 100 นาโนเมตรและมีความหนาแน่นต่ำเพื่อให้ลำอิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้ เพราะถ้าหากตัวอย่างหนาเกินไป จะทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกยิงไปยังตัวอย่างเกิดการสะท้อนกลับทั้งหมดและไม่สามารถทำการวิเคราะห์ได้ ยกตัวอย่างเช่น ตัวอย่างที่มีขนาดเล็กมากพอที่อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านได้ เช่น ผงอนุภาคระดับนาโนที่มีขนาดไม่เกิน



100 นาโนเมตร สามารถเตรียมได้โดยนำตัวอย่างไปทำเป็นสารละลายเจือจางแล้วนำมาหยดลงบนกริด (grid) อนุภาคของตัวอย่างจะไปเกาะอยู่บนกริด ตัวอย่างที่เป็นชิ้นงานขนาดใหญ่จะต้องนำไปตัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปขัดหรือยิงประจุเพื่อให้มีความหนาไม่เกิน 100 นาโนเมตร เป็นต้น ในกรณีที่ต้องการระบุตำแหน่งของตัวอย่างสามารถใช้โลหะหนัก เช่น ยูเรเนียม ตะกั่ว หรือทอง มาแต้มที่ตัวอย่างได้ ซึ่งโลหะหนักจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์เกิดการกระเจิงได้ดีและช่วยให้ได้ภาพที่ชัดเจนขึ้น ข้อจำกัดของเทคนิคนี้คือ พื้นที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์เล็กมาก ถ้าหากเลือกพื้นที่ไม่ถูกต้องจะทำให้ได้ข้อมูลที่ไม่ถูกต้อง ภาพที่ได้จะเป็นภาพ 2 มิติทำให้ไม่สามารถใช้วิเคราะห์ความสูงหรือความหนาของตัวอย่างได้ ถ้าอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำลายตัวอย่างได้เนื่องจากมีพลังงานสูง และมีวิธีการเตรียมตัวอย่างที่ค่อนข้างซับซ้อนและยุ่งยาก

## 2.6.8 ศักย์ซีต้า (Zeta potential) <sup>[30], [68]-[71]</sup>

ศักย์ซีต้า (Zeta potential,  $\zeta$ ) เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผิวอนุภาคโดยมีหลักการดังนี้ เมื่อให้สนามไฟฟ้ากับอนุภาคในสารแขวนลอย ประจุที่ผิวอนุภาคในชั้นประจุไฟฟ้าคู่ (electrical double layer) จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าที่มีประจุตรงกันข้าม (electrophoresis) โดยที่ประจุบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด (-) ในขณะที่ประจุลบจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนด (+) (electrolyte cell) การเคลื่อนที่นี้เรียกว่า electrophoretic mobility ( $\mu_e$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วมวลของประจุ ( $V_s$ ) ในสนามไฟฟ้า (E) ดังแสดงในสมการ <sup>[68]</sup>

$$V_s = \mu_e E$$

ซึ่งค่า electrophoretic mobility ( $\mu_e$ ) ที่วัดได้นี้สามารถนำไปใช้หาค่าศักย์ซีต้าได้จากสมการของ Henry (Henry's equation) ดังสมการ

$$\mu_e = \frac{2\varepsilon\zeta \cdot f(Ka)}{3\eta}$$

เมื่อ	$V_s$	คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุไปยังขั้วไฟฟ้า ( $\mu/s$ )
	E	คือ สนามไฟฟ้า (V/cm)
	$\mu_e$	คือ electrophoretic mobility ( $\mu/s$ )/(V/cm)
	$\zeta$	คือ ศักย์ซีต้า (mV)

- $\varepsilon$  คือ ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของตัวกลาง  
 $\eta$  คือ ความหนืดของตัวกลาง  
 $f(Ka)$  คือ ค่าฟังก์ชันของรัศมี ( $a$ ) ของอนุภาค

ถ้าอนุภาคแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่มีขั้ว สามารถคำนวณค่าศักย์ซีต้าได้จากสมการของ Smoluchowski (Smoluchowski's limit) นั่นคือ

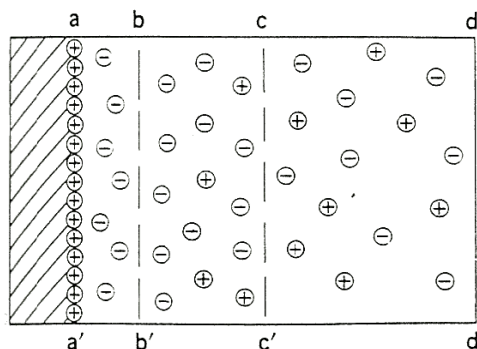
$$\mu_e = \frac{\varepsilon \zeta}{\eta} \quad f(Ka) \gg 1$$

ในทางกลับกันถ้าอนุภาคแขวนลอยอยู่ในตัวกลางที่ไม่มีขั้ว สามารถคำนวณค่าศักย์ซีต้าได้จากสมการของ Hückel (Hückel's limit) นั่นคือ

$$\mu_e = \frac{2\varepsilon \zeta}{3\eta} \quad f(Ka) \ll 1$$

### ชั้นประจุไฟฟ้าคู่ (Electric double layer) <sup>[71]</sup>

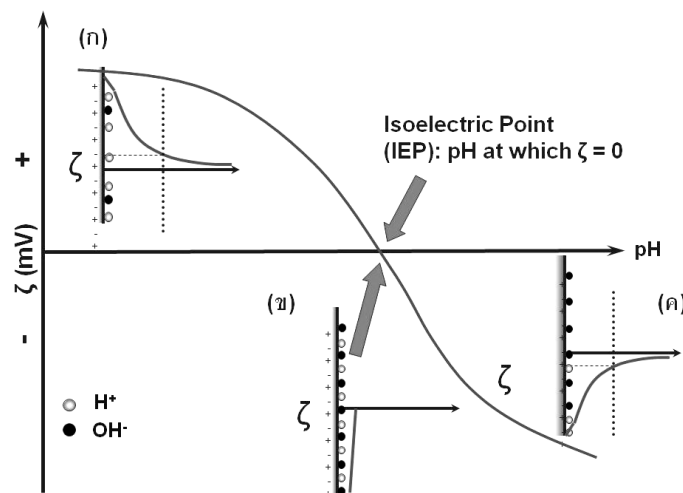
สมมติว่ามีประจุบวกถูกดูดซับอยู่บนผิวของอนุภาคตามแนว  $aa'$  ชั้นที่ถัดออกมาจะมีประจุลบไปจับกับประจุบวกที่ผิวของอนุภาคอย่างหนาแน่น เรียกว่า fixed layer หรือ shear plane ซึ่งจะสิ้นสุดที่แนว  $bb'$  โดยชั้นนี้จะยึดติดและเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาค ชั้นถัดมาซึ่งอยู่ระหว่างแนว  $bb'$  กับ  $cc'$  ที่ชั้นนี้จะมีประจุลบลดลงเรื่อยๆ ตามระยะทางที่ห่างจากแนว  $aa'$  มากขึ้น เรียกว่า mobile layer หรือ diffuse layer ซึ่งทั้งสองชั้นนี้เรียกรวมกันว่า ชั้นประจุไฟฟ้าคู่ (electric double layer) และเมื่อพ้นแนว  $cc'$  ออกไปประจุบวกและประจุลบจะสมดุลกัน เรียกว่า electro-neutral region ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ชั้นประจุไฟฟ้าคู่ที่ผิวของอนุภาค <sup>[71]</sup>

### ปัจจัยที่มีผลต่อศักย์ซีต้า<sup>[30]</sup>

ค่าศักย์ซีต้าสามารถบอกความเสถียรของอนุภาคในสารแขวนลอยได้ กรณีที่วัดค่าศักย์ซีต้าได้เป็นค่าบวกหรือลบ จะแสดงถึงการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคในสารแขวนลอย แต่ถ้าวัดค่าศักย์ซีต้าได้เท่ากับศูนย์ จะแสดงถึงการรวมตัวกันของอนุภาคซึ่งจะตรงกับจุดที่มีประจุเป็นศูนย์หรือจุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point, IEP) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าศักย์ซีต้า เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของตัวกลาง โดยที่ pH ต่ำ จะมีประจุบวกจาก  $H^+$  มาก ทำให้ศักย์ซีต้ามีค่าเป็นบวก ที่จุดไอโซอิเล็กทริก จะมีประจุบวกและประจุลบในปริมาณที่สมดุลกัน ทำให้ศักย์ซีต้ามีค่าเท่ากับศูนย์ และที่ pH สูง จะมีประจุลบจาก  $OH^-$  มากทำให้ศักย์ซีต้ามีค่าเป็นลบ ดังรูปที่ 2.28 ปัจจัยอื่นๆ เช่น ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) ของตัวกลาง ความเข้มข้นและประจุของสารเติมแต่ง เป็นต้น



รูปที่ 2.28 ผลของ pH ต่อค่าศักย์ซีต้า (ก) pH ต่ำ (ข) pH ที่ IEP และ (ค) pH สูง<sup>[68]</sup>

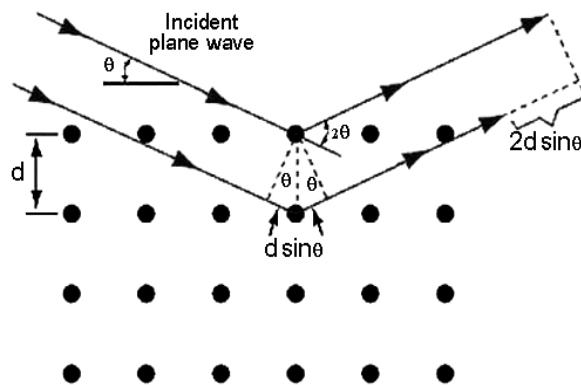
### 2.6.9 การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)<sup>[72]-[74]</sup>

การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและแร่ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์คือ เมื่อดำรงสีตกกระทบบนสารตัวอย่างจะทำให้เกิดการหักเหของลำรังสีแล้วสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบตามกฎของ Bragg ดังสมการ (รูปที่ 2.29)

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

เมื่อ	$n$	คือ ลำดับการสะท้อน (order of reflection)
	$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
	$d$	คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ ( $d$ – spacing)
	$\theta$	คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระยะห่างระหว่างระนาบ

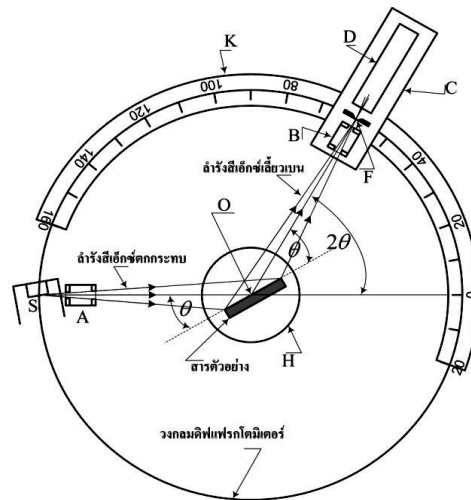
และเนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบโครงสร้างผลึกและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบที่แตกต่างกันและเป็นลักษณะเฉพาะตัวซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม จึงทำให้เกิดการสะท้อนรังสีเอกซ์ในรูปแบบของสารนั้นโดยเฉพาะ



รูปที่ 2.29 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของ Bragg <sup>[74]</sup>

### หลักการทำงานของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ เป็นเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีข้อดีคือ ใช้งานได้ง่าย และมีฐานข้อมูลมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้ ลำรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ผ่านตัวกรองแสงชุดต่างๆ แล้วผ่านมายังสารตัวอย่างที่วางอยู่บนแท่นจับสารซึ่งอยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางของเครื่องโดยที่ผิวระนาบของสารตัวอย่างนั้นจะต้องขนานกับแกนของเครื่อง จากนั้นแท่นจะหมุนอย่างช้าๆ ด้วยความเร็วคงที่เพื่อเพิ่มมุมตกกระทบของลำรังสีเอกซ์บนผิวของสารตัวอย่าง ในขณะที่เดียวกันตัวตรวจวัดซึ่งหมุนด้วยความเร็วเป็น 2 เท่าของสารตัวอย่างจะวัดค่ามุมต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขณะที่สารตัวอย่างเคลื่อนที่และความเข้มของลำรังสีที่เลี้ยวเบนไป โดยที่รูปแบบการเลี้ยวเบนและความเข้มของรังสีที่วัดได้จะถูกนำไปเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุชนิดและบอกปริมาณของเฟสองค์ประกอบของสารตัวอย่างตามลำดับ ดังรูปที่ 2.30

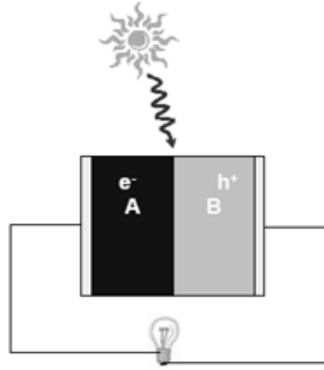


รูปที่ 2.30 ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างของเครื่องเอกซเรย์ดิฟเฟร็กโทมิเตอร์ [72]

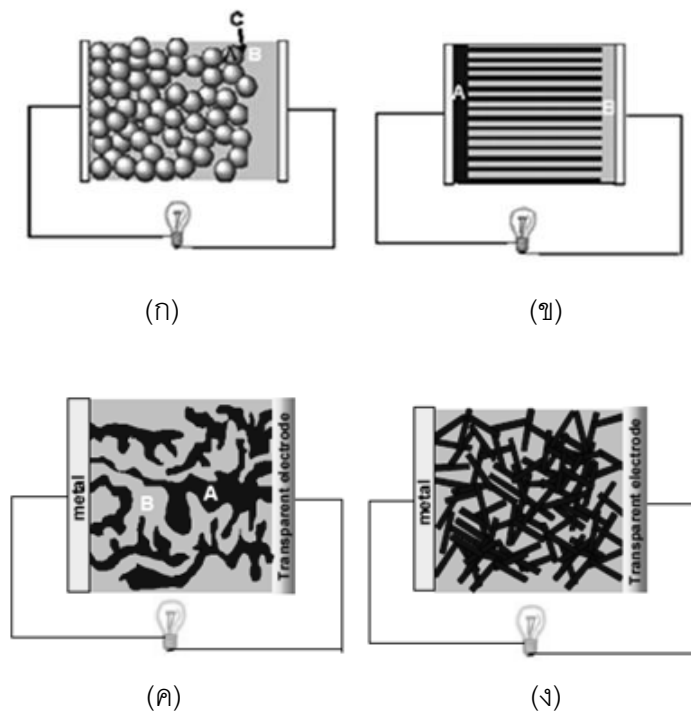
## 2.7 งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

การสร้างอุปกรณ์โฟโตวอลเทจที่มีโครงสร้างแบบเฮเทอโรจังชันได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากโครงสร้างแบบไบเลเยอร์เฮเทอโรจังชัน ดังรูปที่ 2.31 ซึ่งโครงสร้างลักษณะนี้จะทำให้เกิดการแยกประจุที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเฟสของอนุภาคระดับนาโนของสารอินทรีย์กับเฟสของคอนจูเกตพอลิเมอร์เท่านั้น รวมทั้งยังไม่มีช่องทางในการลำเลียงประจุไปยังขั้วไฟฟ้า จึงทำให้เกิดการแยกและส่งผ่านประจุได้น้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ ต่อมาจึงได้มีการปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นแบบบัลค์เฮเทอโรจังชัน ด้วยการทำให้โครงสร้างของทั้งสองเฟสมีลักษณะแทรกกันอยู่และเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายหรืออุโมงค์ขนาดเล็กเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างทั้งสองเฟส ซึ่งทำให้เกิดการแยกประจุมากขึ้นและมีช่องทางในการลำเลียงประจุไปยังขั้วไฟฟ้ามากขึ้น อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักที่พบคือ การแยกเฟสกันเนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาแนวทางต่างๆ ในการแก้ปัญหาดังกล่าว เช่น การใช้สารช่วยกระจายตัวเพื่อให้อนุภาคระดับนาโนของสารอินทรีย์กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของคอนจูเกตพอลิเมอร์ การปรับโครงสร้างของคอนจูเกตพอลิเมอร์ให้มีความเป็นขั้วมากขึ้นหรือการปรับคุณสมบัติของผิวของอนุภาคระดับนาโนของสารอินทรีย์ให้มีความเป็นขั้วน้อยลงเพื่อให้ทั้งสองเฟสสามารถเข้ากันได้ดี การขึ้นรูปชั้นของอนุภาคระดับนาโนของสารอินทรีย์ให้มีโครงสร้างแบบแท่งและโครงสร้างแบบอุโมงค์เชื่อมต่อกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างทั้งสองเฟสและเพิ่มช่องทางในการลำเลียงประจุไปยังขั้วไฟฟ้า การใช้ตัวทำละลายผสมโดยเลือกใช้ตัวทำละลายที่สามารถจับกับผิวของอนุภาคระดับ

นาโนของสารอินทรีย์ได้เพื่อให้อนุภาคนั้นสามารถกระจายในตัวทำละลายหลักได้ดี เป็นต้น ตัวอย่างของโครงสร้างแบบบัลก์เฮเทอโรจังก์ชันของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่เตรียมด้วยวิธีต่างๆ ดังรูปที่ 2.32 โดยมีรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

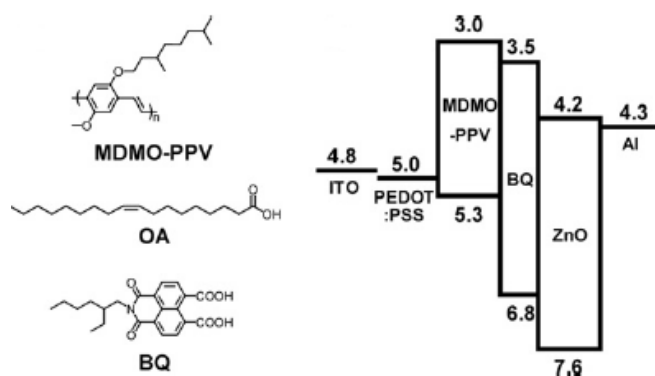


รูปที่ 2.31 โครงสร้างแบบไบเลเยอร์เฮเทอโรจังก์ชันของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก <sup>[75]</sup>



รูปที่ 2.32 โครงสร้างแบบบัลก์เฮเทอโรจังก์ชันของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก (ก) ที่เคลือบผิวของสารอินทรีย์ด้วยวัสดุที่ดูดกลืนแสงได้ (ข) ที่ขึ้นรูปชั้นของสารอินทรีย์ให้มีโครงสร้างแบบแท่ง (ค) ที่ขึ้นรูปชั้นของสารอินทรีย์ให้มีโครงสร้างแบบอุโมงค์เชื่อมต่อกัน และ (ง) ที่เตรียมจากสารอินทรีย์ที่มีรูปร่างแบบนาโนรอด <sup>[75]</sup>

โดยทั่วไปการใช้สารช่วยกระจายตัวในสารแขวนลอยจะช่วยทำให้อนุภาคมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างทั้งสองเฟสมากขึ้น ดังนั้นจึงน่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกให้สูงขึ้นด้วย แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผลที่ได้กลับไม่เป็นเช่นนั้น ยกตัวอย่างเช่น I. Park และคณะ<sup>[76]</sup> ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่เตรียมจากวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/MDMO-PPV โดยใช้ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/โพรพานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร และสารช่วยกระจายตัวที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำและฉนวน ซึ่งได้แก่ 2-(2-ethylhexyl)-,3-dioxo-,3-dihydro-1H-benzo[de]isoquinoline-6,7-dicarboxylic acid (BQ) และกรดโอเลอิก (OA) ตามลำดับ โดยพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารช่วยกระจายตัว OA มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานต่ำที่สุด เนื่องจากความเป็นฉนวนของ OA ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากคอนจูเกตพอลิเมอร์ไปยังอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์จึงทำให้เกิดการแยกประจุได้น้อย ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารช่วยกระจายตัว BQ จะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงที่สุด เพราะนอกจาก BQ จะช่วยให้มีการกระจายตัวที่ดีแล้วยังมีระดับพลังงานที่เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอีกด้วยจึงส่งผลให้มีการแยกประจุที่ดี อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่วัดได้ยังมีค่าค่อนข้างต่ำเพียงร้อยละ 1.23 ( $\pm$  0.23) เท่านั้น โครงสร้างและระดับพลังงานของสารช่วยกระจายตัวทั้งสองดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 โครงสร้างและระดับพลังงานของสารช่วยกระจายตัว OA และ BQ<sup>[76]</sup>

จะเห็นได้ว่าการใช้สารช่วยกระจายตัวจะทำให้เกิดปัญหาตามมาคือความเป็นฉนวนของสารช่วยกระจายตัวจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากคอนจูเกตพอลิเมอร์ไปยังอนุภาคระดับนาโนของสารอินทรีย์ รวมทั้งสารช่วยกระจายตัวส่วนใหญ่จะมีจุดเดือดสูงจึงทำให้กำจัดออกไปได้ยาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกมีค่าค่อนข้าง

ต่ำ นอกจากนี้สารช่วยกระจายตัวบางชนิดที่มีสมบัติกึ่งตัวนำหรือนำไฟฟ้าได้มักจะมีขั้นตอนการสังเคราะห์ที่ค่อนข้างยุ่งยากและมีราคาแพง ซึ่งทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่สูง

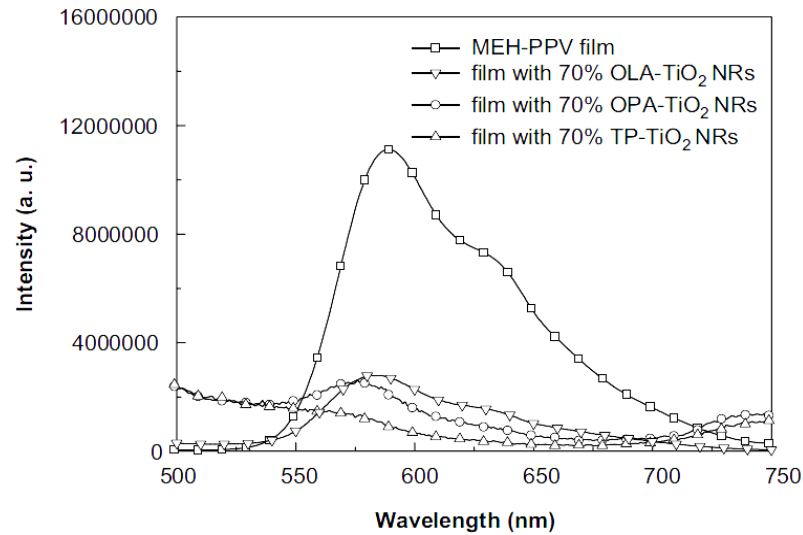
อีกวิธีหนึ่งที่มีนักวิจัยให้ความสนใจมากคือการปรับสมบัติของผิวของอนุภาคระดับนาโนของสารอินทรีย์ให้มีความเป็นขั้วลดลงหรือปรับโครงสร้างของพอลิเมอร์ให้มีความเป็นขั้วมากขึ้น อาทิเช่น

J. Liu และคณะ<sup>[3]</sup> ได้ศึกษาการเคลื่อนที่ของประจุและประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่ผลิตจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอส-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายโทลูอีน โดยการปรับผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยสารปรับผิว (interfacial modifier) ที่มีลิแกนด์ (ligand) แตกต่างกัน ตั้งแต่ในขั้นตอนการสังเคราะห์ซึ่งพบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับผิวด้วยไทโอฟินอล (TP-TiO<sub>2</sub> NRs)/เอ็มอีเอส-พีพีวี จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลงจากฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอส-พีพีวีมากที่สุด และมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับผิวด้วยลิแกนด์ชนิดอื่นๆ ดังรูปที่ 2.34 ซึ่งค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่ลดลงแสดงได้ถึงกการแยกและลำเลียงประจุที่ดีขึ้น เนื่องจากไทโอฟินอลช่วยให้มีการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในระบบที่ดีขึ้น จึงสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนจากเอ็มอีเอส-พีพีวีไปยังไทเทเนียมไดออกไซด์ได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่ได้นั้นมีค่าเพียงร้อยละ 0.157 เท่านั้นซึ่งถือว่าต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากไทโอฟินอลมีสมบัติเป็นฉนวนทำให้ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้

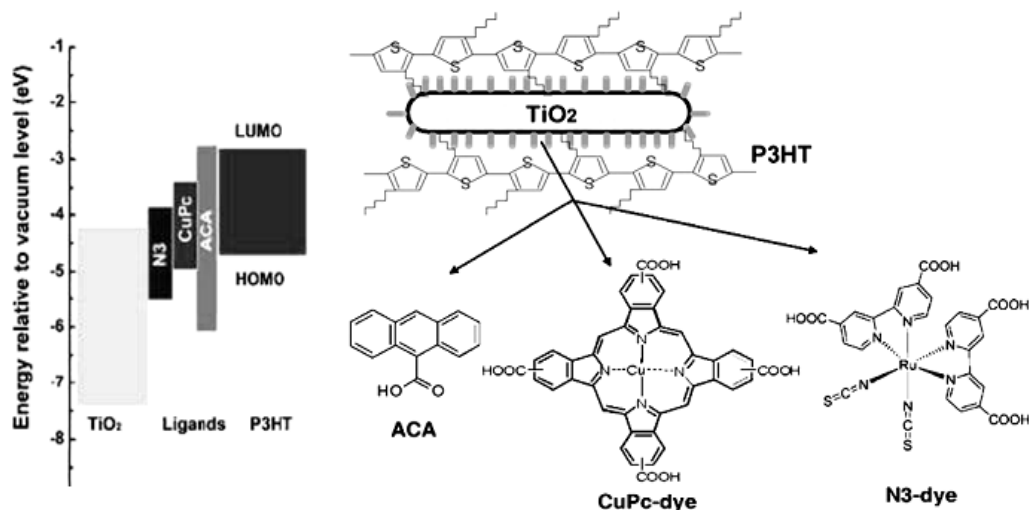
Y. Y. Lin และคณะ<sup>[77]</sup> ได้ศึกษาผลของการปรับผิวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบบัลค์เฮเทอโรจังก์ชันของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชที โดยเลือกใช้สารปรับผิวสามชนิดที่มีลิแกนด์ต่างกัน ได้แก่ anthracene-9-carboxylic acid (ACA), tetracarboxy phthalocyanine copper(II) (CuPc) และ cis-bis(4,4-dicarboxy-2,2-bipyridine)dithiocyanato ruthenium(II) (N3) ดังรูปที่ 2.35 ซึ่งสารทั้งสามชนิดนี้จะมีหมู่คาร์บอกซิลิกและโครงสร้างแบบคอนจูเกตเหมือนกันทำให้สามารถจับกับผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์และเกิดอันตรกิริยากับวงแหวนไทโอฟินของพี3เอชทีได้ โดยพบว่าอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่มีการปรับผิวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วย N3 จะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงที่สุดถึงร้อยละ 2.20 เนื่องจาก N3 มีระดับพลังงานที่เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากพี3เอชทีไปยังอนุภาค



ไทเทเนียมไดออกไซด์และมีโครงสร้างแบบสามมิติ ทำให้เกิดการแยกประจุได้มากและเกิดการกลับมารวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮล (recombination) ได้ช้าลง อย่างไรก็ตาม N3 เป็นสารที่มีธาตุ Ru เป็นพื้นฐานซึ่งสามารถหาได้ยากและมีขั้นตอนการสังเคราะห์ที่ยุ่งยากจึงทำให้มีราคาแพง

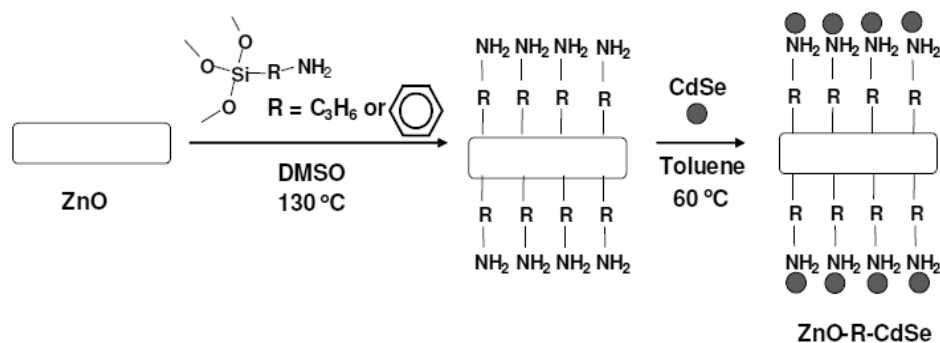


รูปที่ 2.34 สเปกตรากายแสงของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่มีการปรับผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยสารที่มีลิแกนด์ชนิดต่างๆ<sup>[3]</sup>



รูปที่ 2.35 ระดับพลังงานของลิแกนด์ ACA, CuPc และ N3 และภาพรวมแนวคิดของงานวิจัย<sup>[77]</sup>

T. W. Zeng และคณะ<sup>[78]</sup> ได้ศึกษาผลของ bifunctional linker ต่อประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกที่เตรียมจากซิงก์ออกไซด์กับพี3เอชที โดยมีการปรับผิวของซิงก์ออกไซด์นาโนคอลลัมน์ด้วย linker 2 ชนิดคือ 3-aminopropyl trimethoxysilane (APS) และ p-aminophenyl trimethoxysilane (APhS) จากนั้นนำซิงก์ออกไซด์นาโนคอลลัมน์ที่มีการปรับผิวแล้วไปเคลือบด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ (CdSe) เพื่อให้เกิดการส่งผ่านประจุที่ดีขึ้น เนื่องจากแคดเมียมซัลไฟด์มีระดับพลังงานที่เหมาะสมโดยอยู่ระหว่างซิงก์ออกไซด์และพี3เอชที ขั้นตอนการเตรียมดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.36 และนำสารละลายพี3เอชทีในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางบนซิงก์ออกไซด์นาโนคอลลัมน์ที่เตรียมได้ด้วยวิธีสปินแคสตีงเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้พบว่า ชนิดของ linker มีผลต่อการส่งผ่านประจุที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างซิงก์ออกไซด์กับแคดเมียมซัลไฟด์ โดย linker ชนิด APhS ซึ่งมีวงแหวนอะโรมาติกจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงที่สุดถึงร้อยละ 4.8 ทั้งนี้เนื่องจากการส่งผ่านประจุผ่าน  $-(CH_2)_3-$  ในโครงสร้างแบบ aliphatic ของ APS นั้นทำได้ยากกว่า อย่างไรก็ตามขั้นตอนการเตรียมด้วยวิธีนี้มีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก



รูปที่ 2.36 ขั้นตอนการเตรียมซิงก์นาโนคอลลัมน์ที่ใช้ในงานวิจัย<sup>[78]</sup>

Y. M. Chang และคณะ<sup>[79]</sup> ได้ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที ที่มีการปรับโครงสร้างของพอลิเมอร์ให้มีความเป็นขั้วมากขึ้นโดยการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลบนสายโซ่ด้านข้างของพอลิเมอร์ (P3HT-OH) ซึ่งพบว่า หมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนสายโซ่ด้านข้างของพอลิเมอร์นี้จะไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับพันธะ Ti-OH ที่อยู่บนผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่งผลให้ไทเทเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่กว่า 2 เท่า อย่างไรก็ตามขั้นตอนในการปรับโครงสร้างนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก

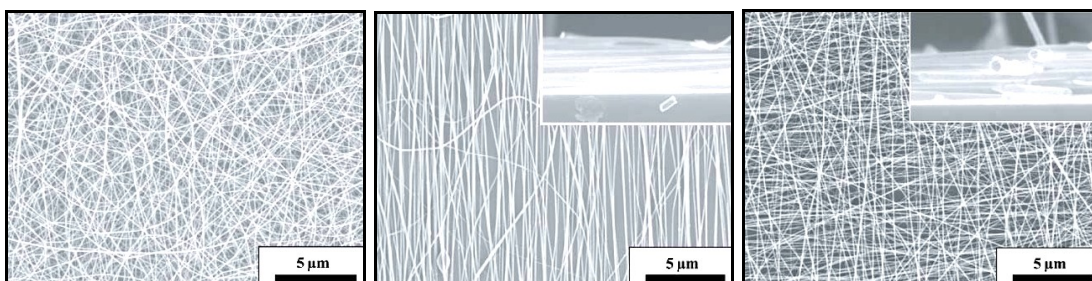
ต่อมาได้มีการพัฒนาอีกขั้น โดยการเตรียมชั้นของอนุภาคระดับนาโนของสารอินทรีย์ให้มีรูปร่างต่างๆ เช่น แท่งนาโน (nanorod) เส้นลวดนาโน (nanowire) เส้นใยนาโน (nanofiber) หรือแบบที่มีกิ่งก้านสาขา<sup>[1]</sup> เป็นต้น ยกตัวอย่างเช่น

M. D. McGehee และคณะ<sup>[2]</sup> ได้ศึกษาการเตรียมโครงสร้างแบบบัลก์เฮเทอโรจังค์ชันโดยทำเป็นลำดับขั้น เริ่มจากการเตรียมฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดรูพรุนระดับนาโนด้วยเทคนิคการระเหยที่ทำให้เกิด self-assembly จากนั้นนำฟิล์มไปจุ่มลงในสารละลายที่มีบล็อกโคพอลิเมอร์ของคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีและไทเทเนียมอีทอกไซด์ เพื่อทำให้เกิดการแทรกซึมของคอนจูเกตพอลิเมอร์ลงไปในรูพรุนของไทเทเนียมไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเองได้พบว่าการเตรียมอุปกรณ์โฟโตวอลเทจิกที่มีโครงสร้างแบบบัลก์เฮเทอโรจังค์ชันด้วยวิธีนี้ยังให้ผลที่ไม่ดีนักเนื่องจากเกิดปัญหาว่าชั้นของคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่อยู่ติดกับขั้วไฟฟ้าทางด้านแคโทดจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังขั้วแคโทด จึงทำให้เกิดเฉพาะการเคลื่อนที่ของโฮลไปสะสมที่ขั้วแอโนดเท่านั้น ส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานต่ำเพียงร้อยละ 0.5

W. H. Baek และคณะ<sup>[5]</sup> ได้ศึกษาการเตรียมชั้นของไทเทเนียมไดออกไซด์รูปร่างแบบแท่งที่มีรูพรุนระดับนาโนในวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีและพีซีบีเอ็มด้วยเทคนิคแม่แบบนาโนอิมพริ้นติ้ง (nanoimprinting) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองเฟส ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานยังมีค่าค่อนข้างต่ำเพียงร้อยละ 1.49 เท่านั้น

H. S. Shim และคณะ<sup>[80]</sup> ได้ศึกษาผลของลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นลวดนาโน (nanowire) ของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค electrospinning ต่อประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีวี ซึ่งมีลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยด้วยกัน 4 รูปแบบคือ แบบสุ่ม แบบทิศทางเดียว และแบบไขว้ และแบบไขว้สองเท่า (double cross) ดังรูปที่ 2.37 โดยพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากเส้นลวดนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากเส้นลวดนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มและวัสดุเชิงประกอบที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางพื้นผิวเรียบ และเมื่อการจัดเรียงตัวของเส้นลวดนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์มีความเป็นระเบียบมากขึ้น ค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้ก็จะมีค่าลดลง โดยที่วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากเส้นลวดนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีการจัดเรียงตัวแบบไขว้สองเท่าจะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงต่ำที่สุด ส่งผลให้มี

ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงที่สุดคือร้อยละ 0.41 เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองเฟสมากขึ้นและสามารถลำเลียงประจุไปยังขั้วไฟฟ้าได้เร็วขึ้น



(ก) แบบสุ่ม

(ข) แบบทิศทางเดียว

(ค) แบบไขว้

รูปที่ 2.37 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นลวดนาโน (nanowire) ของไทเทเนียมไดออกไซด์<sup>[80]</sup>

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวิธีการขึ้นรูปเหล่านี้ต้องใช้เทคนิคที่ค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน รวมทั้งประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ได้ยังมีค่าค่อนข้างต่ำ จึงมีการศึกษาวิธีการอีกแบบหนึ่งที่น่าสนใจซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อนและสามารถควบคุมการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในคอนจูเกตพอลิเมอร์ได้ นั่นคือการใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างตัวทำละลายหลักที่สามารถละลายคอนจูเกตพอลิเมอร์ได้กับตัวทำละลายที่ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งสำหรับปรับผิวของอนุภาคระดับนาโนให้มีสมบัติที่สามารถกระจายในตัวทำละลายหลักได้ดี

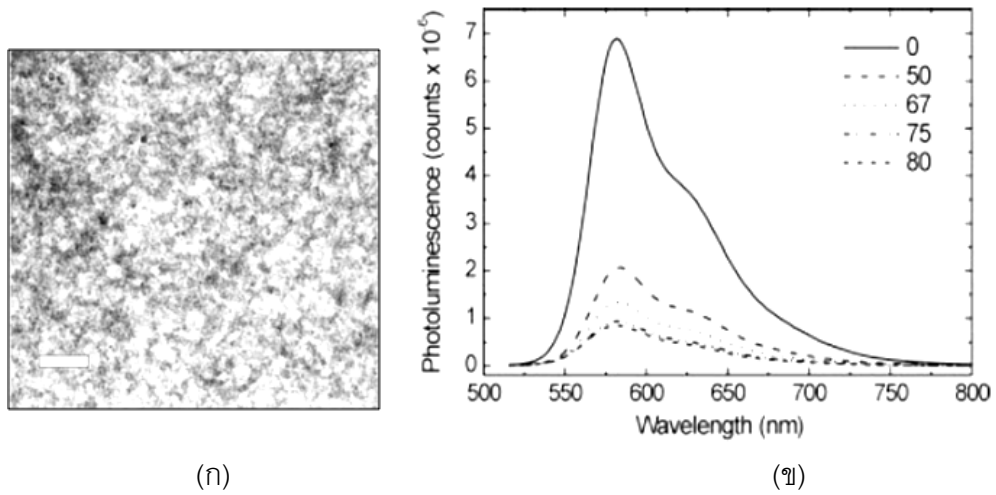
R. Rhodes และคณะ<sup>[7]</sup> ได้ศึกษาความเสถียรในการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงค์ออกไซด์ในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลและคลอโรเบนซีน/ไดคลอโรเบนซีน ซึ่งพบว่าอนุภาคระดับนาโนของซิงค์ออกไซด์มีความเสถียรในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจนของเมทานอลบนผิวของอนุภาคระดับนาโนของซิงค์ออกไซด์ ทำให้ความเป็นขั้วของซิงค์ออกไซด์ลดลงและมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ซึ่งจะไปช่วยลดการเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคระหว่างการก่อตัวเป็นฟิล์มของชั้นโฟโตวอลเทอิกได้ ส่งผลให้มีพื้นฐานวิทยาศาสตร์และประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่ดีขึ้นด้วยเช่นกัน

Y. S. Kim และคณะ<sup>[6]</sup> ได้ศึกษาผลของตัวทำละลายและตัวทำละลายผสม ซึ่งได้แก่ คลอโรฟอร์ม คลอโรเบนซีน ไดคลอโรเบนซีน คลอโรฟอร์ม/คลอโรเบนซีน และคลอโรฟอร์ม/ไดคลอโรเบนซีน ต่อสัณฐานวิทยาและประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของอุปกรณ์พอลิเมอร์โฟโตวอลเทอิกที่มีโครงสร้างแบบบัลก์เฮเทอโรจังก์ชันของคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีกับพีซีบีเอ็ม โดยพบว่าการใช้ตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/คลอโรเบนซีนจะส่งผลให้พี3เอชทีเกิดการตกผลึกเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของฟิล์ม ทำให้ได้ฟิล์มที่มีลักษณะของพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ ทั้งนี้เนื่องจากมีอัตราการระเหยที่เหมาะสมส่งผลให้มีระยะเวลาที่พอที่จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของผลึกที่เป็นระเบียบและเกิดการโตของผลึกที่ไม่มากจนเกินไป จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานที่ดีที่สุดคือร้อยละ 3.68 ในขณะที่ตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/ไดคลอโรเบนซีนซึ่งมีความแตกต่างของความดันไอน้ำจะส่งผลให้มีอัตราการแข่งขันของการโตของผลึกสูง ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ได้จึงขรุขระและมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานต่ำ

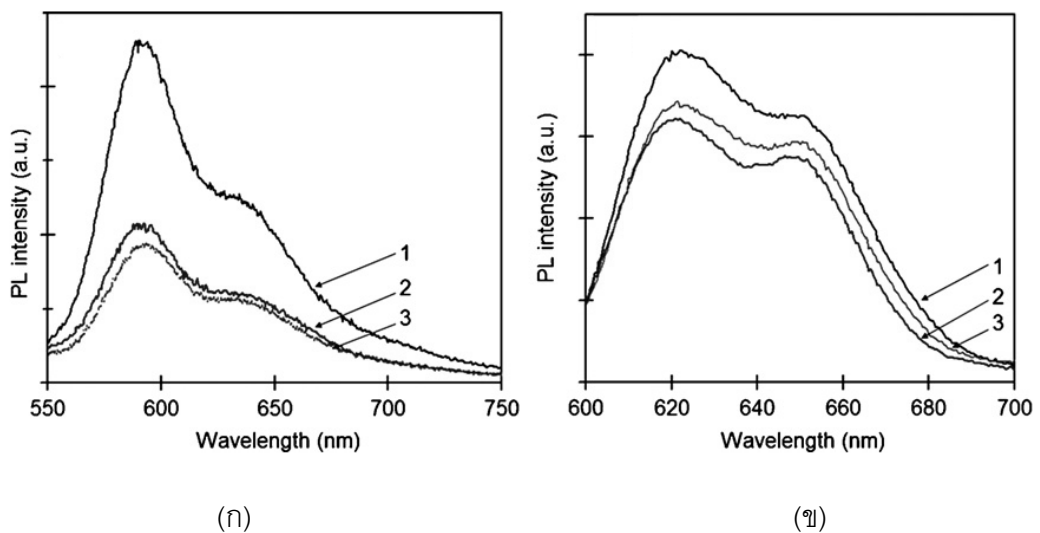
W. J. E. Beek และคณะ<sup>[81]</sup> ได้ศึกษาประสิทธิภาพของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/MDMO-PPV ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 5 โดยปริมาตร โดยพบว่า การเตรียมฟิล์มวัสดุเชิงประกอบจากสารแขวนลอยในตัวทำละลายผสมดังกล่าวสามารถทำได้และช่วยให้มีการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ในเมทริกซ์ของคอนจูเกตพอลิเมอร์ MDMO-PPV ที่ดี ดังรูปที่ 2.38 (ก) โดยบริเวณที่เป็นสีเข้มกว่าจะแสดงถึงอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ ในส่วนบริเวณที่เป็นสีอ่อนกว่าจะแสดงถึง MDMO-PPV นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มสัดส่วนโดยน้ำหนักของซิงก์ออกไซด์จะส่งผลให้ค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลง ดังรูปที่ 2.38 (ข) อย่างไรก็ตามที่สัดส่วนของซิงก์ออกไซด์มากกว่าร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก ค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้จะเริ่มคงที่เนื่องจากเกิดการเกาะตัวกันของซิงก์ออกไซด์ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกเฟส

T. Hirunprateep และคณะ<sup>[82]</sup> ได้ศึกษาผลของการใช้ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลต่อสภาวะการกระจายตัวและประสิทธิภาพในการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/พี3เอชที โดยพบว่า การใช้ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลจะช่วยให้การกระจายตัวอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ดีขึ้น ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเฟสของซิงก์ออกไซด์กับเฟสของคอนจูเกตพอลิเมอร์มากขึ้นและมีการแยกประจุที่ดีขึ้น โดยที่ค่าความเข้ม

แสงของการคายแสงจะมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลสูงขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.38 (ก) การกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์ (สีเข้ม) ใน MDMO-PPV (สีอ่อน) ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน และ (ข) สเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของซิงก์ออกไซด์/MDMO-PPV ที่สัดส่วนของซิงก์ออกไซด์ต่างๆ<sup>[81]</sup>



รูปที่ 2.39 สเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ (ก) ซิงก์ออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี และ (ข) ซิงก์ออกไซด์/พี3เอชที ที่เตรียมจาก (1) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (2) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร และ (3) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร<sup>[82]</sup>

อย่างไรก็ดีในงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วยังไม่มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงชนิดและสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวทำละลายหลักและตัวทำละลายที่ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งอย่างเป็นระบบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ 2 ชนิดคือเอ็มอีเอช-พีพีวีและพี3เอชที โดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างตัวทำละลายที่ดีสำหรับคอนจูเกตพอลิเมอร์ ซึ่งได้แก่ คลอโรเบนซีนและคลอโรฟอร์ม กับสารในกลุ่มแอลกอฮอล์ ได้แก่ เมทานอล เอทานอล 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งเพื่อช่วยปรับการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้ดีขึ้น โดยจะทำการเปลี่ยนชนิดของแอลกอฮอล์รวมทั้งสัดส่วนของตัวทำละลายทั้งสองชนิดและปรับเปลี่ยนสัดส่วนระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์และคอนจูเกตพอลิเมอร์อย่างเป็นระบบ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของคอนจูเกตพอลิเมอร์และการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ภายในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติในการแยกและการลำเลียงประจุ รวมถึงประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิก ดังนั้นการศึกษากการเตรียมฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์โดยใช้ตัวทำละลายผสม จึงเป็นแนวทางในการพัฒนาอีกขั้นหนึ่งที่จะทำให้ได้วัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์กับคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพในการแยกประจุสูงและส่งต่อประจุได้ดีสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์เป็นอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกในเซลล์สุริยะได้ต่อไป

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 คอนจูเกตพอลิเมอร์

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้คอนจูเกตพอลิเมอร์ 2 ชนิด ได้แก่ เอ็มอีเอช-พีพีวี (Poly(2-methoxy-5-(2-ethyl-hexyloxy)-1,4-phenylvinylene; MEH-PPV) สูตรโมเลกุล  $(C_{18}H_{28}O_2)_n$  จากบริษัท Sigma-Aldrich (รหัสสินค้า 541443-1g) โดยมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ( $M_n$ ) เท่ากับ 40,000 – 70,000 g/mol ค่า polydispersity ( $M_w/M_n$ ) เท่ากับ 6.0 และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.00 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และพี3เอชที (Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl); P3HT) สูตรโมเลกุล  $(C_{10}H_{14}S)_n$  จากบริษัท Sigma-Aldrich (รหัสสินค้า 445703-1g) โดยมีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน ( $M_n$ ) เท่ากับ 30,000 – 60,000 g/mol มีลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์แบบ head-to-tail regioregular มากกว่าร้อยละ 98 และมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยที่พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นคอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิด p-type (การนำไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของ hole) ซึ่งสมบัติอื่นๆ ของคอนจูเกตพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด แสดงไว้ในภาคผนวก ก และ ข ตามลำดับ

##### 3.1.2 อนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์

ผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $TiO_2$ ) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซื้อมาจากบริษัท Sigma-Aldrich (รหัสสินค้า 637654) มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 79.87 กรัมต่อโมล โดยมีการจัดเรียงโครงสร้างแบบอะนาเทสและมีขนาดของอนุภาคเดี่ยวโดยเฉลี่ย <25 นาโนเมตร

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติ (Characterization) ของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

- เฟสของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) (D8-Advance; Bruker) โดยการใช้การแผ่รังสี  $Cu K\alpha$



- ขนาดของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) (JEM-2100; JEOL)
- สมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) (Analytica Specord 100 spectrometer) โดยเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำที่ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก กวนผสมด้วยเครื่อง magnetic stirrer (C-MAG HS7; IKA®) ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
- ศักย์ซีต้า (Zeta potential) ของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจายตัวในน้ำที่ pH ต่างๆ ด้วยเทคนิค ZetaPlus (Brookhaven Instruments) โดยเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในน้ำที่ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก กวนผสมด้วยเครื่อง magnetic stirrer (C-MAG HS7; IKA®) ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้อนุภาคกระจายตัวในน้ำ และปรับ pH ด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.005, 0.01, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ และสารละลาย HCl ความเข้มข้น 0.01 และ 0.09 โมลาร์

โดยสมบัติอื่นๆ ของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ แสดงไว้ในภาคผนวก ค

### 3.1.3 ตัวทำละลายหลัก

ตัวทำละลายหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด ได้แก่ ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ( $C_6H_5Cl$ ) จากบริษัท RCI Labscan (AR Grade) รหัสสินค้า AR1026 มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 112.56 กรัมต่อโมล จุดเดือดเท่ากับ 131.7 องศาเซลเซียส และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 5.62 (ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) และตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ( $CH_3Cl$ ) จากบริษัท RCI Labscan (AR Grade) รหัสสินค้า AR1027E มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 119.38 กรัมต่อโมล จุดเดือดเท่ากับ 61.2 องศาเซลเซียส และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.81 (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) โดยสมบัติอื่นๆ ของตัวทำละลายหลักทั้ง 2 ชนิดแสดงไว้ในภาคผนวก ง และ จ ตามลำดับ

### 3.1.4 ตัวทำละลายที่ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่ง

ตัวทำละลายที่ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแอลกอฮอล์ 4 ชนิด ซึ่งได้แก่ เมทานอล ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), เอทานอล ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), 1-โพรพานอล ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ ) และ 1-บิวทานอล ( $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$ ) จากบริษัท RCI Labscan (AR Grade) (รหัสสินค้า AR1115, AR1069, AR1161 และ AR1024 ตามลำดับ) โดยมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 32.04, 46.07, 60.10 และ 74.12 กรัมต่อโมล จุดเดือดเท่ากับ 64.7, 78.3, 97.2 และ 117.9 องศาเซลเซียส และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 32.70, 24.55, 20.33 และ 17.80 (ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ตามลำดับ โดยสมบัติอื่นๆ ของแอลกอฮอล์ทั้ง 4 ชนิดแสดงไว้ในภาคผนวก ข ช ช และ ฉ

## 3.2 การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสม

### 3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสม

ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์และคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ โดยมีวิธีการและขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

1. คำนวณและชั่งน้ำหนักผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์และตัวทำละลายหลักคลอโรเบนซีนหรือคลอโรฟอร์ม ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อตัวทำละลายหลักเท่ากับร้อยละ 0.25, 0.50 และ 1 โดยปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 น้ำหนักของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (คำนวณที่ปริมาตรของตัวทำละลายหลักเท่ากับ 50 มิลลิลิตร)

น้ำหนัก (กรัม)	สัดส่วนร้อยละโดยปริมาตรของ $\text{TiO}_2$		
	ร้อยละ 0.25	ร้อยละ 0.5	ร้อยละ 1
อนุภาคระดับนาโนของ $\text{TiO}_2$	0.488	0.975	1.950
คลอโรเบนซีน	55.5	55.5	55.5
คลอโรฟอร์ม	74.2	74.2	74.2

2. ผสมผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์กับตัวทำละลายหลัก แล้วนำไปกวนผสมด้วยเครื่อง magnetic stirrer (C-MAG HS7; IKA®) ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

3. นำสารแขวนลอยไปอัลตราโซนิกในอ่างอัลตราโซนิก (S30H; Elmasonic) เป็นเวลา 10 นาที ตามด้วยอัลตราโซนิกเคทด้วยโพรบโดยใช้เครื่อง High Intensity Ultrasonic Processor (VCX 130 Vibra-cell; Sonics & Materials Inc.) อีก 15 นาที ทำสลับกันรวมทั้งหมด 4 รอบ เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดี

4. คำนวณและชั่งน้ำหนักของตัวทำละลายหลักและแอลกอฮอล์ โดยในตัวทำละลายหลักชนิดคลอโรเบนซีนจะใช้สัดส่วนของแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 0, 10 และ 20 โดยปริมาตร และในตัวทำละลายหลักชนิดคลอโรฟอร์มจะใช้สัดส่วนของแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 0, 5, และ 10 โดยปริมาตร ซึ่งสารในกลุ่มของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ เมทานอล เอทานอล 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอล โดยน้ำหนักของตัวทำละลายหลักและแอลกอฮอล์ที่ใช้ในสัดส่วนต่างๆ ที่คำนวณได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสมที่สัดส่วนของแอลกอฮอล์ต่างๆ (คำนวณที่ปริมาตรของสารแขวนลอยเท่ากับ 2 มิลลิลิตร)

น้ำหนัก (กรัม)	สัดส่วนร้อยละโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์		
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 10	ร้อยละ 20
คลอโรเบนซีน	0.5500	0.2750	-
เมทานอล	-	0.1980	0.3960
เอทานอล	-	0.1973	0.3945
1-โพรพานอล	-	0.2009	0.4018
1-บิวทานอล	-	0.2025	0.4050

น้ำหนัก (กรัม)	สัดส่วนร้อยละโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์		
	ร้อยละ 0	ร้อยละ 5	ร้อยละ 10
คลอโรฟอร์ม	0.7415	0.5561	0.3707
เมทานอล	-	0.0990	0.1980
เอทานอล	-	0.0987	0.1973

5. แบ่งสารแขวนลอยที่เตรียมได้ปริมาณครึ่งหนึ่งมากรองด้วยตัวกรองชนิดไนลอนขนาดรูผ่าน 0.45 ไมครอน

6. ผสมสารแขวนลอยทั้งที่กรองแล้วและไม่ได้กรองกับแอลกอฮอล์ตามสัดส่วนที่ชั่งไว้ด้วยเครื่อง magnetic stirrer ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที

7. นำสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสมที่เตรียมได้ที่ไม่ได้กรองไปศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสมด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสง (Laser light scattering) (Mastersizer 2000; Malvern Instruments, Ltd.)

8. นำสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสมที่เตรียมได้ที่ผ่านการกรองแล้วไปศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) (Analytica Specord 100 spectrometer) และศึกษาสมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่เตรียมได้จากตัวทำละลายผสมด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (BX 60M; Olympus®) และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM) (SPI3800N Nanoscope II; Seiko Instrument Inc.) โดยการหยดสารแขวนลอยลงบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ทำความสะอาดด้วยการต้มในสารละลาย piranha (ภาคผนวก ญ)

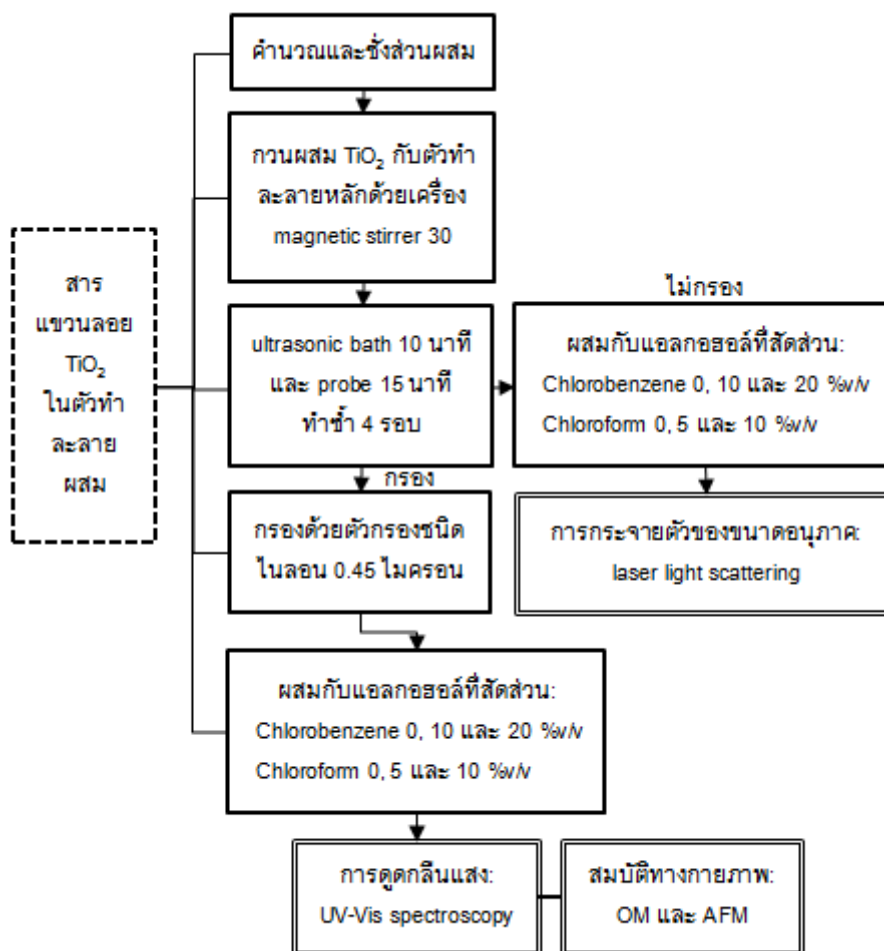
### 3.2.2 การศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสม

1. ศึกษาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสมด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสง (Laser light scattering) (Mastersizer 2000; Malvern Instruments, Ltd.) โดยใช้  $\mu\text{P}$  unit เนื่องจากสามารถทนต่อตัวกลางที่ใช้ซึ่งก็คือตัวทำละลายคลอโรเบนซีนได้

2. ศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสมที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis spectroscopy) (Analytica Specord 100 spectrometer) โดยนำสารแขวนลอยที่เตรียมได้ใส่ใน quartz cuvette ประมาณ 2 มิลลิลิตร วัดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 800 นาโนเมตร โดยใช้เวลา integration เท่ากับ 32.00 มิลลิวินาที และใช้ตัวทำละลายผสมใน quartz cuvette เป็น blank

3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (BX 60M; Olympus®) และเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopy, AFM) (SPI3800N Nanoscope II; Seiko Instrument Inc.) โดยใช้โหมดการทำงานแบบกึ่งสัมผัส (Tapping mode) และอุปกรณ์ตรวจวัดหรือเข็มวัด (NSG01; Seiko Instrument Inc.) ที่มีค่าคงที่ของแรงเท่ากับ 1.45–15.1 นิวตันต่อเมตร และมีค่าความถี่สั่นพ้อง 87–230 กิโลเฮิร์ต และหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของอนุภาคที่เตรียมได้โดยการวัด full width at half maximum (FWHM) (รายละเอียดอธิบายไว้ในภาคผนวก ก) ซึ่งจะวัดอย่างน้อย 50 อนุภาค เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

ขั้นตอนในการเตรียมและศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสมดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการเตรียมและศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสม

### 3.3 การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์

#### 3.3.1 การเตรียมสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์

ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์และคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ โดยมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อคอนจูเกตพอลิเมอร์ทั้งหมด 3 สัดส่วนคือ 0.5:1, 1:1 และ 2:1 โดยปริมาตร ซึ่งมีวิธีการและขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

1. คำนวณและชั่งน้ำหนักผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์และตัวทำละลายหลักคลอโรเบนซีนหรือคลอโรฟอร์ม ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อคอนจูเกตพอลิเมอร์เท่ากับ 0.5:1, 1:1 และ 2:1 โดยปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 น้ำหนักของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ (คำนวณที่ปริมาตรของตัวทำละลายหลักเท่ากับ 50 มิลลิลิตร)

น้ำหนัก (กรัม)	สัดส่วนโดยปริมาตรของ $\text{TiO}_2$ :MEH-PPV		
	0.5:1	1:1	2:1
อนุภาคระดับนาโนของ $\text{TiO}_2$	0.488	0.975	0.195
คลอโรเบนซีน	55.5	55.5	55.5
คลอโรฟอร์ม	74.2	74.2	74.2

น้ำหนัก (กรัม)	สัดส่วนโดยปริมาตรของ $\text{TiO}_2$ :P3HT		
	0.5:1	1:1	2:1
อนุภาคระดับนาโนของ $\text{TiO}_2$	0.475	0.950	0.190
คลอโรเบนซีน	55.5	55.5	55.5
คลอโรฟอร์ม	74.2	74.2	74.2

2. เตรียมสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.2.1 ข้อที่ 2-6

3. นำสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายหลักและตัวทำละลายผสมที่เตรียมได้มาผสมกับคอนจูเกตพอลิเมอร์ โดยให้มีความเข้มข้นของคอนจูเกตพอลิเมอร์ต่อสารแขวนลอยเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ด้วยเครื่อง magnetic stirrer ที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือจนกว่าคอนจูเกตพอลิเมอร์จะละลายทั้งหมด โดยในงานวิจัยนี้คอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดพี3เอชทีจะละลายในตัวทำละลายผสมได้ยาก ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสในระหว่างการกวนผสมด้วย เพื่อให้เกิดการละลายของคอนจูเกตพอลิเมอร์ที่ดีขึ้น

4. นำสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มาวิเคราะห์หาปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน (Thermal Gravimetric Analysis) (TGA/DSC1; Mettler-Toledo) และวิเคราะห์หาขนาดและศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) (JEM-2100; JEOL)

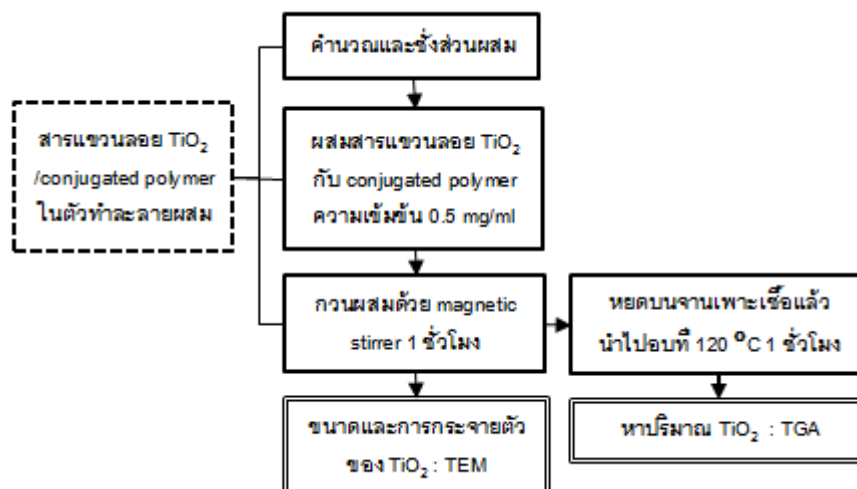
### 3.3.2 การศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์

1. วิเคราะห์หาปริมาณของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน (Thermal Gravimetric Analysis) (TGA/DSC1; Mettler-Toledo) โดยนำสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มาหยดบนจานเพาะเชื้อ ปล่อยให้แห้ง แล้วนำไปอบในเตาสู่ญญากาศที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจนแห้ง จากนั้นนำมาชูดให้เป็นผงและนำไปวิเคราะห์ทางความร้อน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ปริมาณสารตัวอย่างเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัม ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 25–1000 องศาเซลเซียส ในอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน

2. วิเคราะห์หาขนาดและศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) (JEM-2100; JEOL) เตรียมตัวอย่างโดยนำสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มาหยดบนกริด (grid) แล้วนำไปอบในเตาสู่ญญากาศที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจนแห้ง

ขั้นตอนในการเตรียมและศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ในตัวทำละลายผสมดังแสดงในรูปที่ 3.2





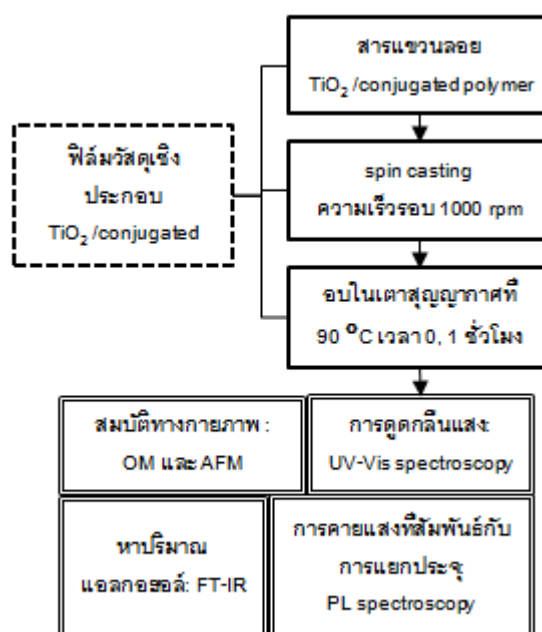
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนในการเตรียมและศึกษาสมบัติของของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ในตัวทำละลายผสม

### 3.4 การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์

- นำสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มาขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยวิธี Spin casting (P6700; Specialty Coating System Inc.) บน quartz slide โดยใช้ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที
- นำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีเพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ภายในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบและสมบัติการคายแสงที่สัมพันธ์กับการแยกประจุด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (photoluminescence spectroscopy) (LS55; Perkin-Elmer)
- นำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปอบในเตาสัญญากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบหลังการอบ ซึ่งได้แก่ สันฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม การจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ภายในฟิล์มด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี และสมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

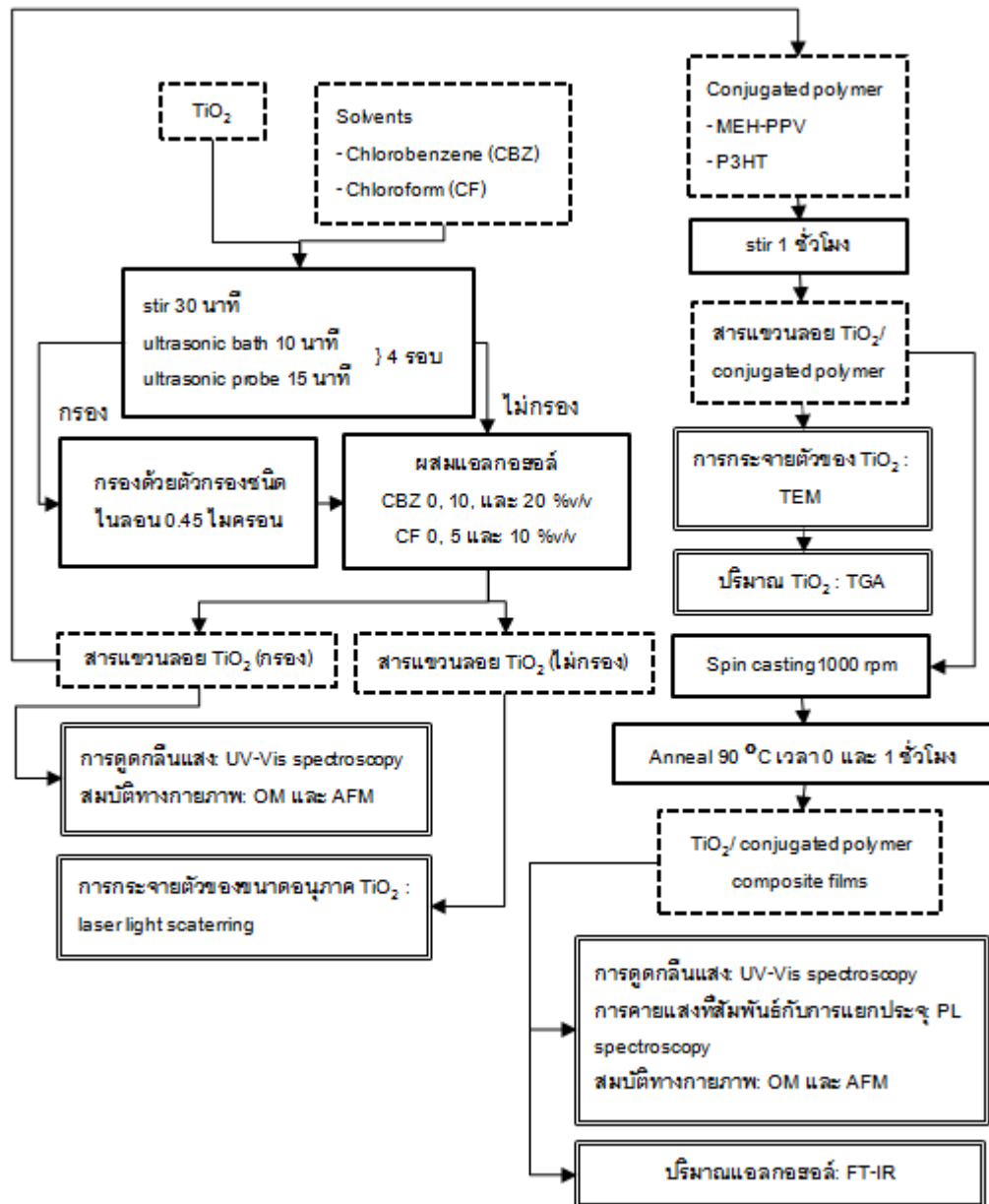
5. นำสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มาขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยวิธี Spin casting บนแผ่นกระจกสไลด์ โดยใช้ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที แบ่งฟิล์มวัสดุเชิงประกอบครึ่งหนึ่งที่เตรียมได้ไปอบในเตาสัญญากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำฟิล์มทั้งหมดมาชุบให้เป็นผงแล้วนำมาทดสอบหาปริมาณของแอลกอฮอล์ที่หลงเหลือภายในฟิล์มหลังอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR spectroscopy) (Spectrum One; Perkin-Elmer) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการทดสอบด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงและเตรียมตัวอย่างโดยการอัดขึ้นรูปเป็น KBr pellet (press disc)

ขั้นตอนในการเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนในการเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์

## 3.5 แผนผังงานวิจัย



รูปที่ 3.4 แผนผังงานวิจัย

## บทที่ 4

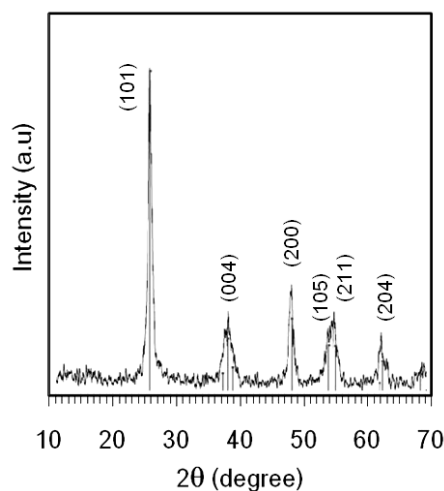
### ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยผลการทดลองดังนี้ ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัย ผลการศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์และตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ที่มีการเปลี่ยนสัดส่วนโดยปริมาตรและชนิดของแอลกอฮอล์ ผลการศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ และผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบทั้งสมบัติทางกายภาพและทางแสง

#### 4.1 การศึกษาลักษณะสมบัติของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์

##### 4.1.1 เฟสของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์

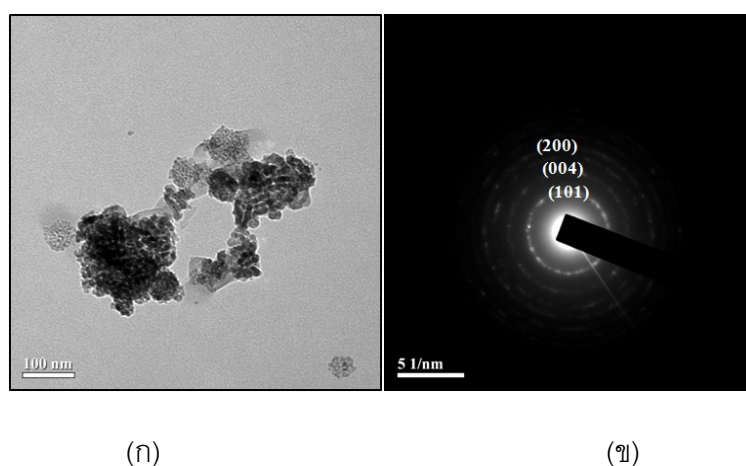
จากการศึกษาเฟสของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเทคนิคการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า มีพีคเกิดขึ้นที่  $2\theta$  เท่ากับ 25, 38, 48, 54, 55 และ 62 องศา ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (101), (004), (200), (105), (211) และ (204) ของโครงสร้างเตตระโกนอล (tetragonal structure) ในโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส<sup>[85]-[87]</sup> ตามกฎของ Bragg ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2



รูปที่ 4.1 xrd pattern ของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัย

#### 4.1.2 เฟส รูปร่าง และขนาดของผองอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์

จากรูป bright-field image ที่ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน พบว่าอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีรูปร่างทั้งที่เป็นทรงกลมและแท่งสั้นๆ โดยส่วนใหญ่เป็นทรงกลมและมีขนาดของอนุภาคตั้งแต่ 10 ถึง 25 นาโนเมตร นอกจากนี้ผล diffraction pattern ที่ได้มีลักษณะเป็นวงที่ระนาบ (101), (004) และ (200) ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับผล xrd pattern ในการทดลองข้างต้น<sup>[87], [88]</sup>



รูปที่ 4.2 (ก) bright-field image และ (ข) diffraction pattern ของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ ศึกษาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน

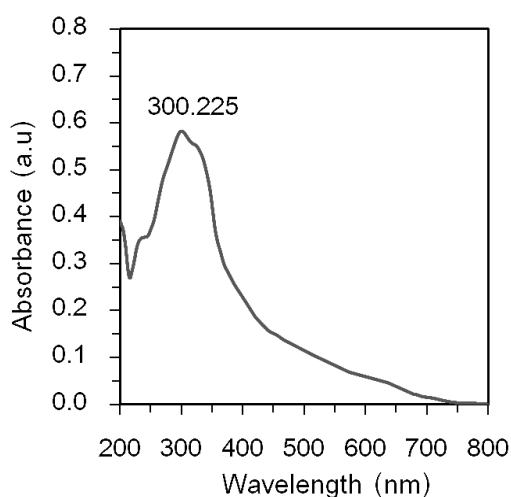
#### 4.1.3 สมบัติการดูดกลืนแสงของผองอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจายตัวในน้ำ

ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทส จะมีสมบัติเป็นวัสดุกึ่งตัวนำโดยมีค่าพลังงานของแถบพลังงานช่องว่าง (Band gap energy) เท่ากับ 3.2 eV ซึ่งสามารถนำไปใช้คำนวณเพื่อหาความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดได้จากสมการ<sup>[89], [90]</sup>

$$E = hc / \lambda$$

เมื่อ	E	คือ ค่าพลังงานของแถบพลังงานช่องว่าง (eV = $1.602 \times 10^{-19}$ J)
	h	คือ ค่าคงที่ของ Planck มีค่าเท่ากับ $6.626 \times 10^{-34}$ J·s
	c	คือ ค่าความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ $3 \times 10^8$ m/s
	$\lambda$	คือ ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด (นาโนเมตร (nm))

จากการคำนวณจะได้ว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสจะต้องการความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดเท่ากับ 385 นาโนเมตร<sup>[86], [87], [91], [92]</sup> แต่จากการวัดด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีพบว่า ผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 300.225 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่เลื่อนมาทางช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (blue shift) ถึง 85 นาโนเมตร อาจเกิดจากปรากฏการณ์การจำกัดเชิงควอนตัม (quantum confinement effects)<sup>[90], [91], [93]</sup> ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กในระดับนาโนจึงทำให้อิเล็กตรอนถูกจำกัดในการเคลื่อนที่ซึ่งส่งผลต่อการดูดกลืนแสงด้วย

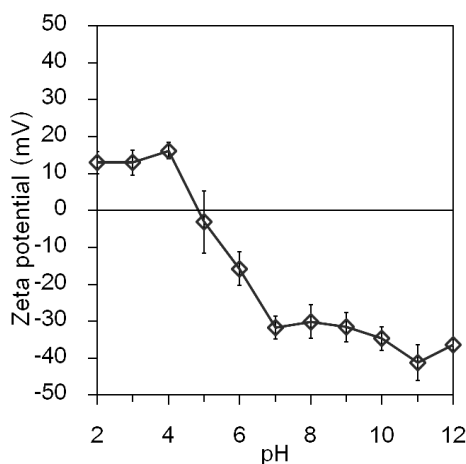


รูปที่ 4.3 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่กระจายตัวในน้ำ

#### 4.1.4 สมบัติศักย์ซีต้าของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ pH ต่างๆ ในตัวกลางน้ำ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า สารแขวนลอยที่มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีหรือมีความเสถียรของอนุภาคสูงจะต้องมีค่าศักย์ซีต้าสัมบูรณ์ ( $|\zeta|$ ) มากกว่าหรือเท่ากับ 30 mV ( $-30 \geq \zeta$  หรือ  $\zeta \geq 30$ )<sup>[92], [94]</sup> ซึ่งจากผลการศึกษาสมบัติศักย์ซีต้าของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้โดยทำการวัดค่าที่ pH ต่างๆ พบว่าค่าศักย์ซีต้าที่วัดได้ในช่วง pH 2 ถึง 4 จะมีค่าเป็นบวกและค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 12 ถึง 16 mV และเมื่อปรับ pH ให้สูงขึ้นเรื่อยๆ ค่าศักย์ซีต้าจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยจะมีค่าเท่ากับศูนย์ที่ pH เท่ากับ 4.83 (IEP) และเริ่มมีค่าเป็นลบที่ pH~5 จนกระทั่งที่ pH~7 ค่าศักย์ซีต้าจะเริ่มคงที่ โดยมีค่าอยู่ในช่วง -30

ถึง  $-40$  mV ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งมีค่าศักย์สัมบูรณ์มากกว่า  $30$  mV ดังนั้นผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงสามารถกระจายตัวได้ดีหรือมีความเสถียรในสารแขวนลอยที่มีค่า pH มากกว่า 7<sup>[94], [95]</sup>

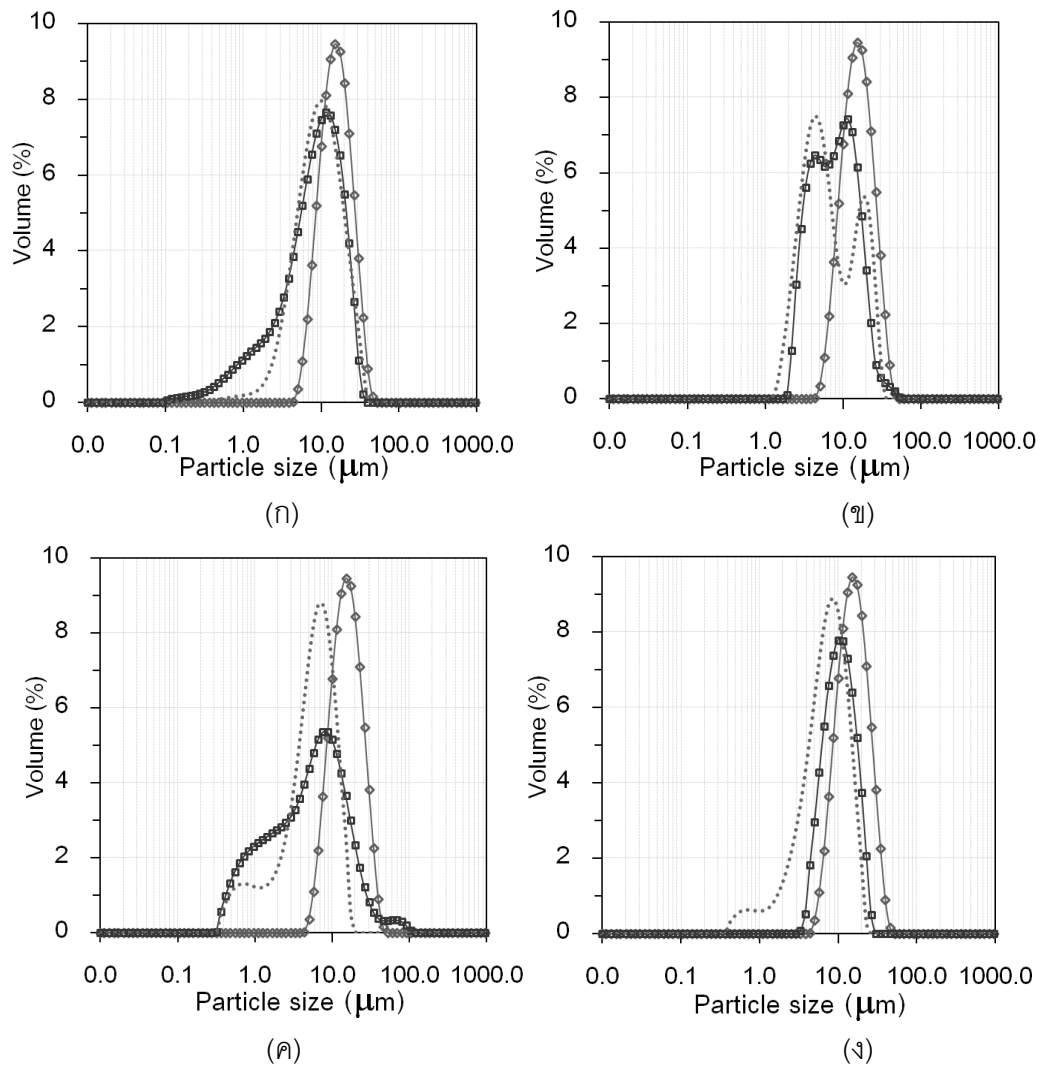


รูปที่ 4.4 ศักย์ซีต้าของผงอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ pH ต่างๆ

## 4.2 การศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์

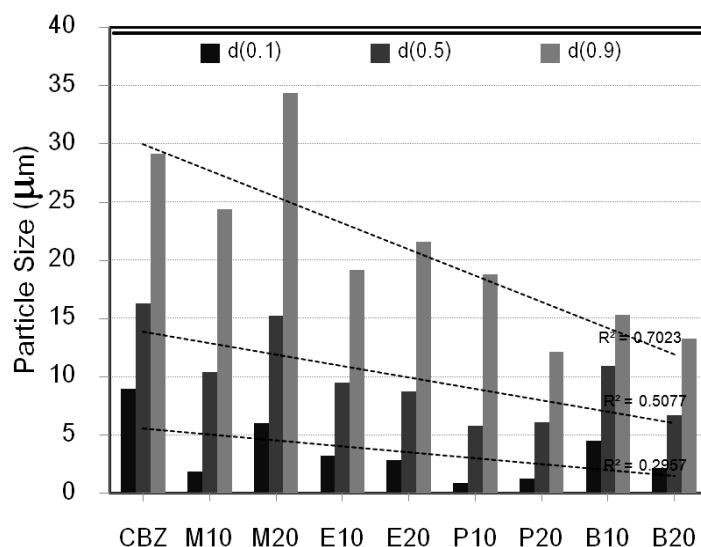
### 4.2.1 ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม

การศึกษาขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ก่อนการกรอง ด้วยเทคนิคการวัดการกระเจิงแสง (Laser light scattering) พบว่า การเติมแอลกอฮอล์ลงไปในสารแขวนลอยช่วยให้อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 4.5 โดยการเติมแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาวขึ้นมีแนวโน้มที่จะช่วยให้อนุภาคกระจายตัวได้ดีขึ้น และมีการกระจายขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงมากขึ้น ซึ่งแสดงได้จากค่า  $d(0.1)$ ,  $d(0.5)$  และ  $d(0.9)$  ของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4.6 อย่างไรก็ตามผลของสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ต่อการกระจายตัวของอนุภาคในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ยังไม่มีผลแตกต่างกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.5 การกระจายขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/ แอลกอฮอล์ชนิด (ก) เมทานอล (ข) เอทานอล (ค) 1-โพรพานอล และ (ง) 1-บิวทานอล ก่อนการกรอง ที่สัดส่วนของแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 0 (◇) 10 (◻) และ 20 (●●●) โดยปริมาตร

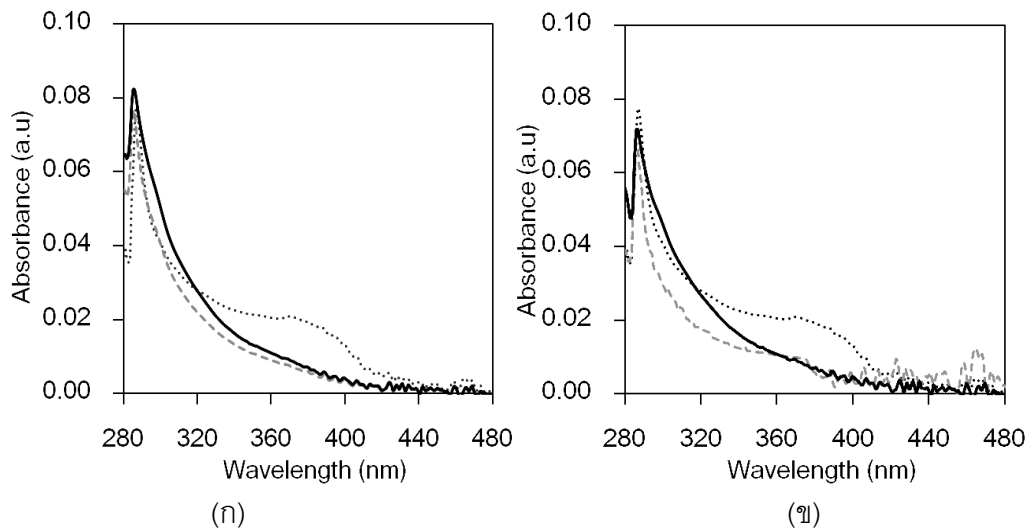




รูปที่ 4.6 ค่า d(0.1), d(0.5) และ d(0.9) ของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร

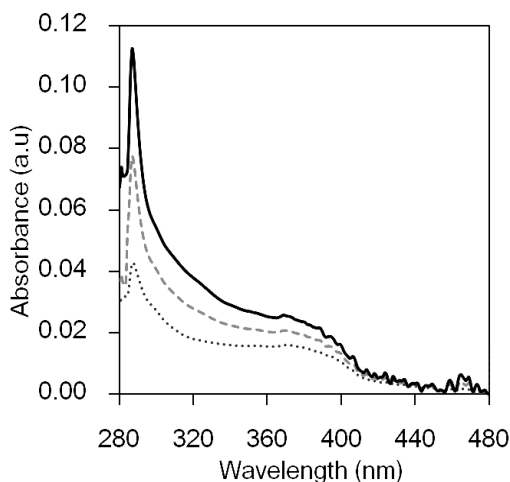
#### 4.2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสม

จากการศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ หลังการกรอง โดยการวัดสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีพบว่า อนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมจะมีการดูดกลืนแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลต และมีค่าการดูดกลืนแสงรวมทั้งตำแหน่งความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนสูงสุดใกล้เคียงกันทั้งหมด ซึ่งแสดงถึงปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใกล้เคียงกัน โดยความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนสูงสุดที่วัดได้ในงานวิจัยนี้จะอยู่ที่ประมาณ 300 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาสเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนพบว่า มีไหล่เกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 380 นาโนเมตร แต่ไม่พบในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งการดูดกลืนแสงของอนุภาคในช่วงความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น (red shift) เกิดจากการดูดกลืนแสงของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติมแอลกอฮอล์ลงไปในสารแขวนลอยช่วยให้อนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์กระจายตัวในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องพิจารณาผลการทดลองอื่นๆ ประกอบด้วย



รูปที่ 4.7 การดูดกลืนแสงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (•••) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (ก) เมทานอล และ (ข) 1-บิวทานอล ที่สัดส่วนของแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 10 (---) และ 20 (—) โดยปริมาตร

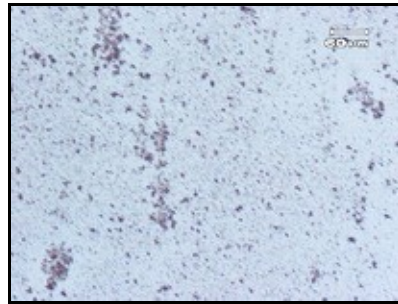
ต่อมาได้ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อตัวทำละลายคลอโรเบนซีนเป็นร้อยละ 0.25, 0.5 และ 1 โดยปริมาตร และทดสอบหาปริมาณของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนโดยวัดการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีซึ่งพบว่า ตำแหน่งความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนทั้งสามสัดส่วนมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ที่ประมาณ 300 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.8 โดยค่าการดูดกลืนแสงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 1 โดยปริมาตรจะมีค่ามากที่สุด และจะมีค่าลดต่ำลงตามสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ลดลงนั่นคือร้อยละ 0.5 และ 0.25 โดยปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้สามารถบ่งบอกได้ถึงปริมาณของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีอยู่ในสารแขวนลอย โดยค่าการดูดกลืนแสงที่สูงขึ้นแสดงถึงปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องพิจารณาผลการศึกษานี้ประกอบด้วยกัน ประกอบด้วยเช่นกัน



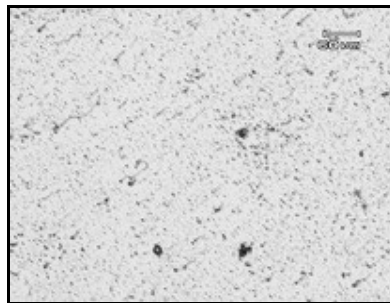
รูปที่ 4.8 การดูดกลืนแสงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.25 (•••) 0.5 (---) และ 1 (—) โดยปริมาตร

#### 4.2.3 สมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัวและขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

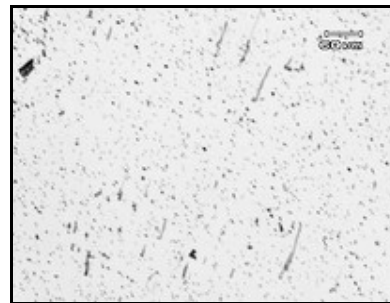
จากการศึกษาภาพโดยกว้างของสมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัวและขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร หลังการกรอง โดยการหยดบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์และศึกษาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่า อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนจะมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ยังไม่ค่อยดีนักเนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค ทำให้มีกลุ่มของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก ในขณะที่อนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์จะมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีกว่า ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดกลืนแสงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีดังที่กล่าวมาในข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปลี่ยนสัดส่วนโดยปริมาตรและชนิดของแอลกอฮอล์พบว่า ลักษณะการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดค่อนข้างใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้



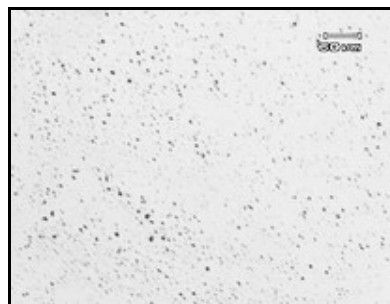
(n)



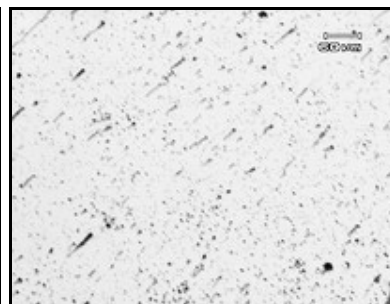
(l)



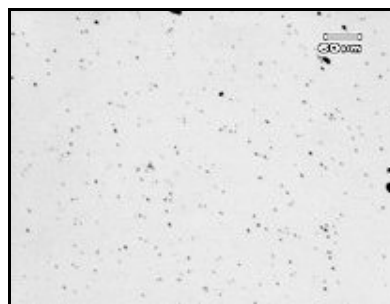
(m)



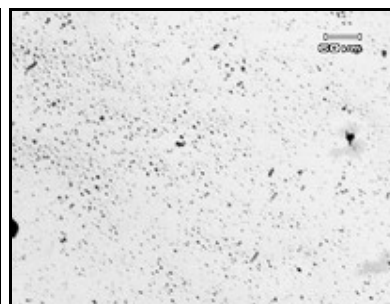
(o)



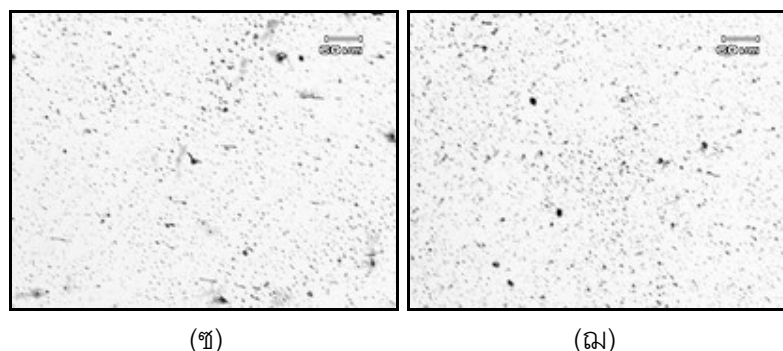
(p)



(q)



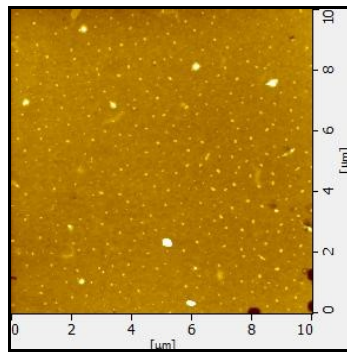
(r)



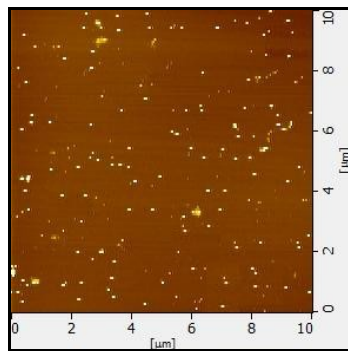
รูปที่ 4.9 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ใน (ก) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนผสมเมทานอล (ข) ร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผสมเอทานอล (ง) ร้อยละ 10 และ (จ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผสม 1-โพรพานอล (ฉ) ร้อยละ 10 และ (ช) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และผสม 1-บิวทานอล (ซ) ร้อยละ 10 และ (ฅ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร

#### 4.2.4 สมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัว ขนาดอนุภาค และสัณฐานวิทยาของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

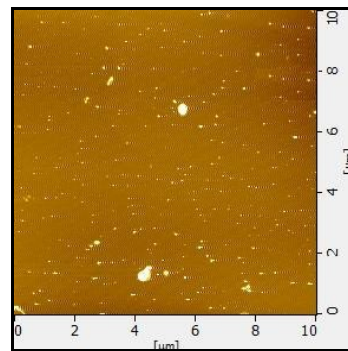
จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัว ขนาดอนุภาค และสัณฐานวิทยาของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร โดยการหยดบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ และศึกษาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมพบว่า ลักษณะการกระจายตัว ขนาดและความสูงโดยเฉลี่ยของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์หลังการกรองนั้นค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยการเติมแอลกอฮอล์รวมทั้งการเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์จากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 มีแนวโน้มช่วยให้อนุภาคกระจายตัวได้ดีขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.10 โดยค่าขนาดความกว้างของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการเตรียมสารแขวนลอยในปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ดังกล่าวสำหรับงานวิจัยนี้จะอยู่ในช่วง  $37.86 \pm 11.22$  ถึง  $49.77 \pm 14.59$  นาโนเมตร และความสูงของอนุภาคอยู่ในช่วง  $2.00 \pm 2.25$  ถึง  $6.59 \pm 2.12$  นาโนเมตร ดังตารางที่



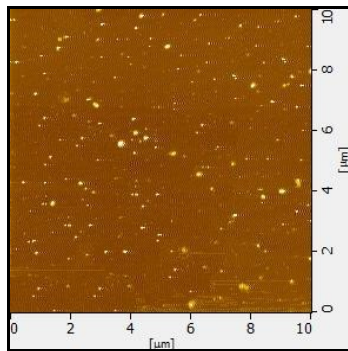
(n)



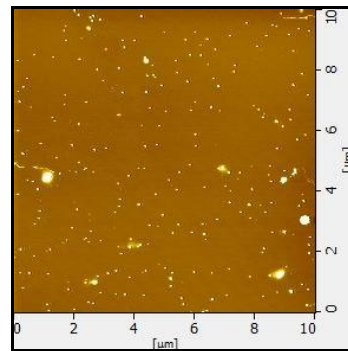
(ni)



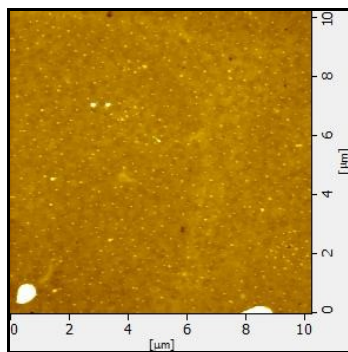
(ni)



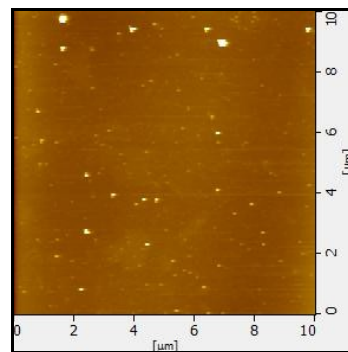
(nj)



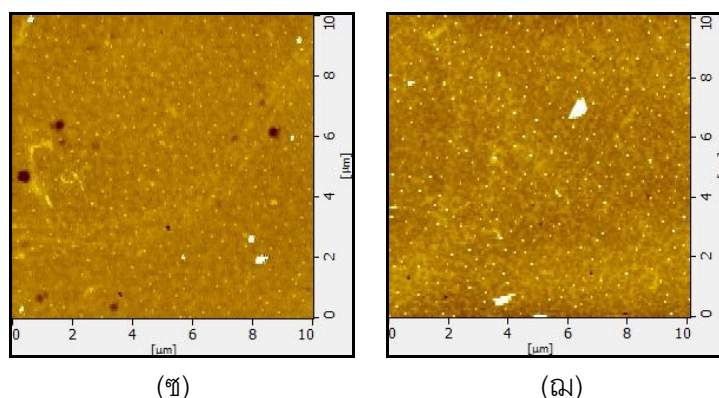
(nj)



(nk)



(nk)

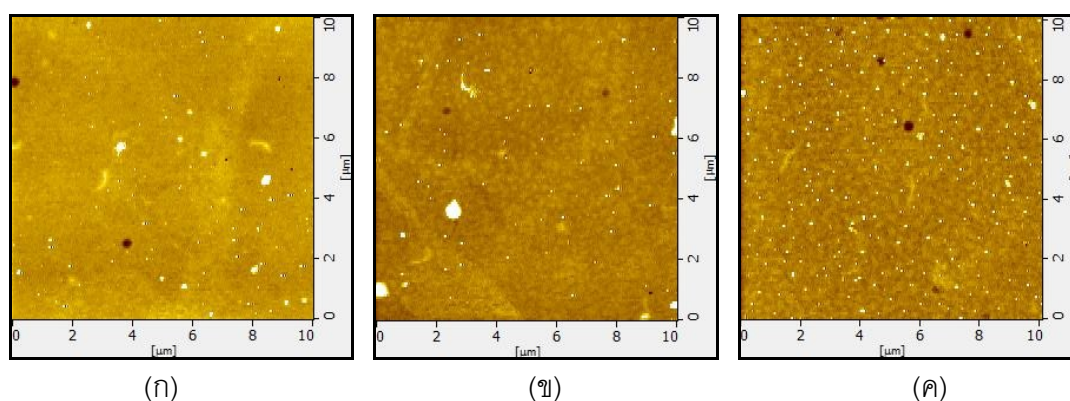


รูปที่ 4.10 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ใน (ก) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนผสมเมทานอล (ข) ร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผสมเอทานอล (ง) ร้อยละ 10 และ (จ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผสม 1-โพรพานอล (ฉ) ร้อยละ 10 และ (ช) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และผสม 1-บิวทานอล (ซ) ร้อยละ 10 และ (ฅ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.1 ความขรุขระของตัวอย่าง ขนาดความกว้าง และความสูงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร

ตัวทำละลาย	สัดส่วนของแอลกอฮอล์ (%v/v)	ความกว้างของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูงของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
คลอโรเบนซีน	0	49.77±14.59	6.59±2.12	1.43±0.20
คลอโรเบนซีน/ เมทานอล	10	42.16±11.34	2.00±2.25	1.52±0.02
	20	37.86±11.22	5.53±1.39	1.30±0.45
คลอโรเบนซีน/ เอทานอล	10	42.90±9.68	3.14±2.43	1.26±0.53
	20	47.01±7.11	3.75±2.12	1.54±0.17
คลอโรเบนซีน/ 1-โพรพานอล	10	48.28±10.22	3.78±1.55	1.21±0.29
	20	43.51±9.59	2.61±1.76	1.23±0.28
คลอโรเบนซีน/ 1-บิวทานอล	10	48.24±11.08	3.56±2.66	1.74±0.31
	20	48.14±9.22	4.66±3.06	1.39±0.42

ต่อมาได้ทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อตัวทำละลายคลอโรเบนซีน เป็นร้อยละ 0.25 และ 1 โดยปริมาตร เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อขนาด และการกระจายตัวของอนุภาคในสารแขวนลอยซึ่งพบว่า ที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ เท่ากับร้อยละ 0.25 โดยปริมาตร จะมีจำนวนอนุภาคกระจายตัวอยู่น้อยกว่าที่สัดส่วนร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรตามผลการทดลองในหัวข้อก่อนหน้านี้ และเมื่อเติมเมทานอลลงไปในสารแขวนลอย พบว่า มีการกระจายตัวของอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ดีขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยที่เมื่อเพิ่ม สัดส่วนของแอลกอฮอล์จากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผลที่ได้จะไม่แตกต่างกันอย่าง ชัดเจน ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งขนาดความกว้างของอนุภาคที่วัดได้จะอยู่ในช่วง  $53.30 \pm 5.91$  ถึง  $53.92 \pm 7.11$  นาโนเมตร และความสูงของอนุภาคอยู่ในช่วง  $3.49 \pm 1.54$  ถึง  $4.81 \pm 2.41$  นาโนเมตร ดังตารางที่ 4.2



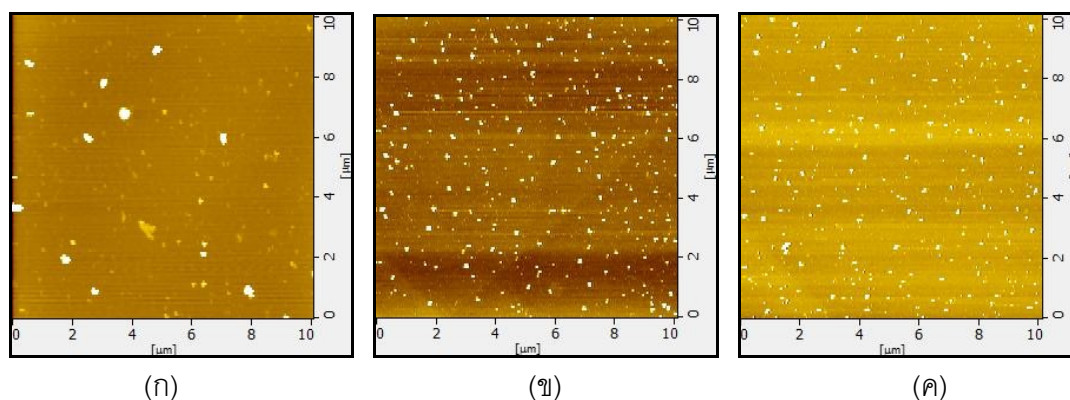
รูปที่ 4.11 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ใน (ก) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (ข) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.25 โดยปริมาตร



ตารางที่ 4.2 ความขรุขระของตัวอย่าง ขนาดความกว้าง และความสูงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.25 โดยปริมาตร

ตัวทำละลาย	สัดส่วนของ แอลกอฮอล์ (%v/v)	ความกว้าง ของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูง ของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
คลอโรเบนซีน	0	53.92±7.11	3.49±1.54	2.54±0.89
คลอโรเบนซีน/ เมทานอล	10	53.54±6.05	4.81±2.41	1.68±0.88
	20	53.30±5.91	4.54±2.48	1.62±0.88

และเมื่อเปลี่ยนสัดส่วนของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นร้อยละ 1 โดยปริมาตรพบว่า ที่สัดส่วนนี้จะมีจำนวนอนุภาคกระจายตัวอยู่มาก ใกล้เคียงกับตัวอย่างที่เตรียมที่ สัดส่วนของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร และพบ การเกาะตัวกันของอนุภาคบางจุดในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ดังรูป ที่ 4.12 และเมื่อเติมเมทานอลลงไปพบว่าอนุภาคกระจายตัวได้ดีขึ้น การเกิดการเกาะกลุ่มกันของ อนุภาคลดลง จนแทบจะไม่มีเกาะตัวกันของอนุภาคเลย โดยที่สัดส่วนของเมทานอลเท่ากับ ร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตรจะมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งขนาด ความกว้างของอนุภาคที่วัดได้นี้จะอยู่ในช่วง 54.02±9.61 ถึง 57.83±16.36 นาโนเมตร และความ สูงของอนุภาคอยู่ในช่วง 1.18±1.82 ถึง 2.97±1.59 นาโนเมตร ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.12 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ใน (ก) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (ข) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 1 โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.3 ความขรุขระของตัวอย่าง ขนาดความกว้าง และความสูงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 1 โดยปริมาตร

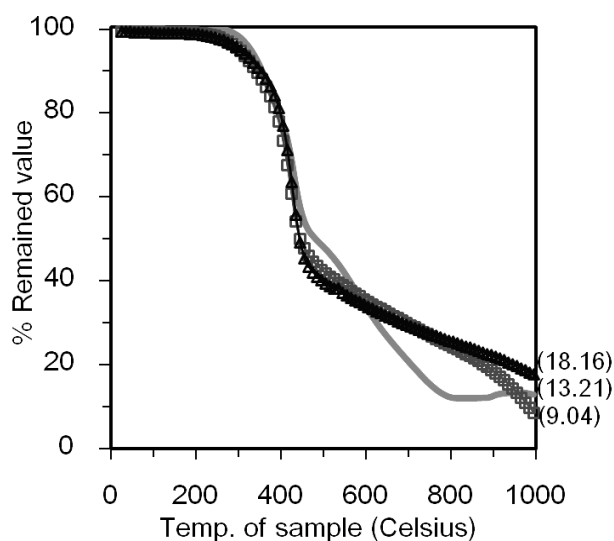
ตัวทำละลาย	สัดส่วนของแอลกอฮอล์ (%v/v)	ความกว้างของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูงของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
คลอโรเบนซีน	0	57.83±16.36	2.97±1.59	2.28±0.93
คลอโรเบนซีน/ เมทานอล	10	54.86±8.63	1.18±1.82	1.51±0.95
	20	54.02±9.61	2.05±1.98	1.45±0.63

#### 4.3 การศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์

##### 4.3.1 การหาปริมาณของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์

จากการทดสอบหาปริมาณที่แท้จริงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลาย

คลอโรเบนซีน หลังการกรอง ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อนพบว่า ร้อยละของน้ำหนักของสารที่คงเหลือเมื่อให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ในอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน จะแปรผันตามสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการเตรียมสารแขวนลอยนั้นคือ ที่สัดส่วนของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อเอ็มอีเอช-พีพีวีเท่ากับ 2:1 โดยปริมาตร จะมีค่าร้อยละของน้ำหนักของสารที่คงเหลือมากที่สุดคือร้อยละ 18.16 รองลงมาได้แก่ สัดส่วน 1:1 และ 0.5:1 โดยปริมาตร ซึ่งมีค่าร้อยละของน้ำหนักของสารที่คงเหลือเท่ากับร้อยละ 13.21 และ 9.04 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.4 ซึ่งในผลการศึกษาหลังจากนี้ทางผู้วิจัยจะเรียกสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่นำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มวัสดุเชิงประกอบตามร้อยละของน้ำหนักของสารที่คงเหลือเนื่องจากเป็นปริมาณที่แท้จริงของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหลือในฟิล์มและเพื่อไม่ให้เกิดความสับสนในการศึกษาลำดับต่อไป



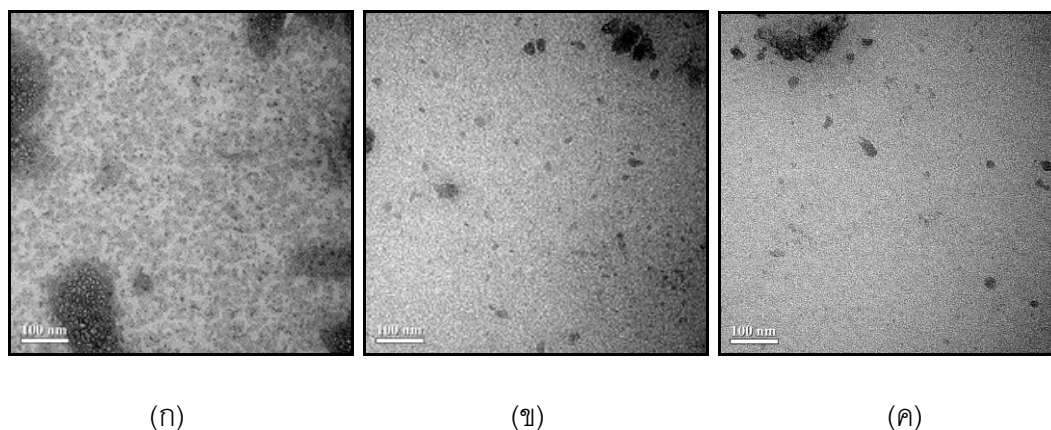
รูปที่ 4.13 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและร้อยละของน้ำหนักที่คงเหลือของสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีเท่ากับ (▲) 0.5:1 (—) 1:1 และ (■) 2:1 โดยปริมาตรตามลำดับ วิเคราะห์ด้วยเทคนิคภายใต้ความร้อน

ตารางที่ 4.4 การทดสอบหาปริมาณของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภายใต้ความร้อน

สัดส่วนของ $\text{TiO}_2$ :MEH-PPV (v/v) ในตัวอย่าง	น้ำหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัม)	ร้อยละของ น้ำหนักที่ หายไป	ร้อยละของ น้ำหนัก คงเหลือ
(1) สัดส่วน 0.5:1	2.7958	90.9644	9.0356
(2) สัดส่วน 1:1	1.5354	86.7931	13.2069
(3) สัดส่วน 2:1	3.2783	81.8410	18.1590

#### 4.3.2. โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี

ผลการศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ศึกษาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านพบว่า ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนจะมีการเกาะกันของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (สีดำเข้ม) เป็นกลุ่มอนุภาคขนาดใหญ่อยู่ในเมทริกซ์ของเอ็มอีเอช-พีพีวี (สีอ่อน) ดังรูปที่ 4.14 (ก) ในขณะที่สารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เอทานอลจะมีกลุ่มของอนุภาคที่เกิดการเกาะกลุ่มกันลดลงและจะเกิดการเกาะกลุ่มกันเพียงเล็กน้อยเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเอทานอลสูงขึ้นเป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ดังรูปที่ 4.14 (ข) และ (ค) โดยที่ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคที่สามารถวิเคราะห์ได้จากเทคนิคนี้จะอยู่ในช่วง 50-100 นาโนเมตร



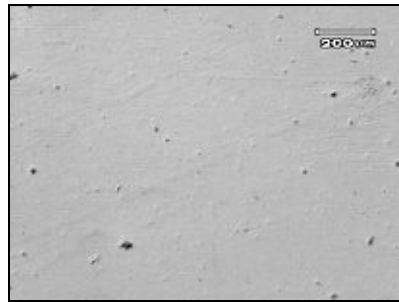
รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจาก (ก) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (ข) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เอทานอลร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

#### 4.4 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์

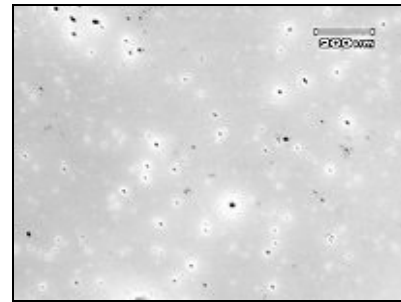
##### 4.4.1 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์

จากการนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ความเข้มข้นของคอนจูเกตพอลิเมอร์เท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มาขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางโดยวิธีการหมุนสปิน แคลสตั้งที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที กรองที่ขนาด 0.45 ไมครอน และศึกษาโครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของฟิล์มที่เตรียมได้เทียบกับฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมที่ความเข้มข้นของคอนจูเกตพอลิเมอร์เท่ากันด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงซึ่งพบว่า ฟิล์มทั้งหมดที่เตรียมได้จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ โดยที่ฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีจะมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ดังรูปที่ 4.15 ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบจะมีอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์รวมทั้งกลุ่มของพอลิเมอร์จำนวนมากกระจายอยู่ทั่วๆ พื้นผิวของฟิล์ม อย่างไรก็ตามในด้านความแตกต่างของชนิดและสัดส่วนโดยปริมาตรของ

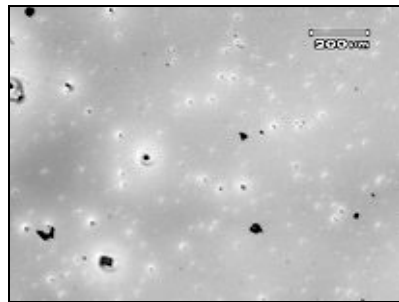
แอลกอฮอล์ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอนุภาคบนพื้นผิวของฟิล์มนั้นกลับไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนนักเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้



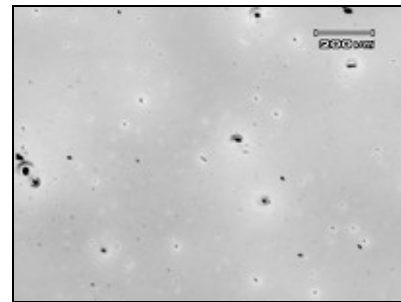
(ก)



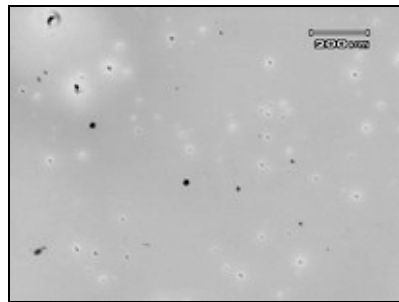
(ข)



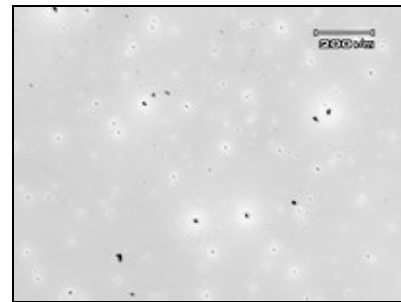
(ค)



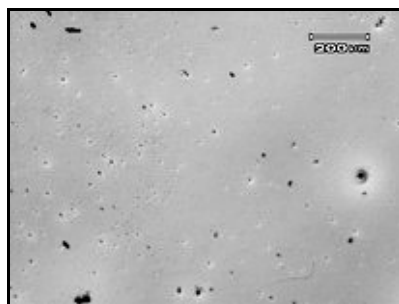
(ง)



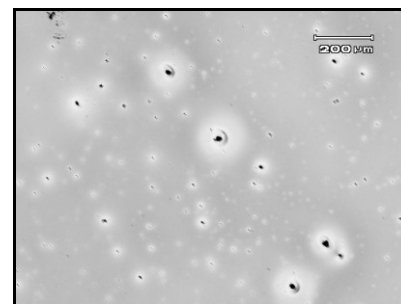
(จ)



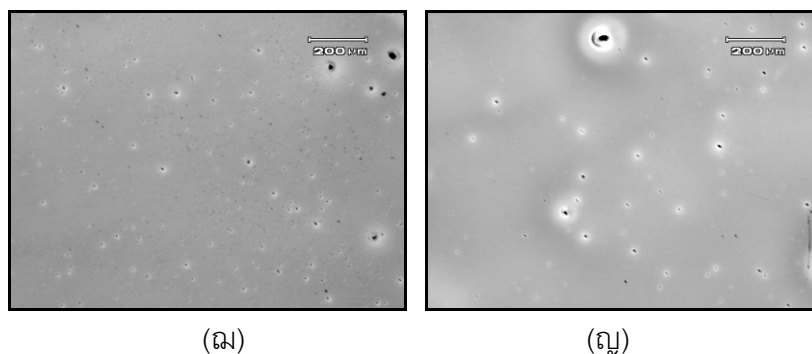
(ฉ)



(ช)



(ฌ)



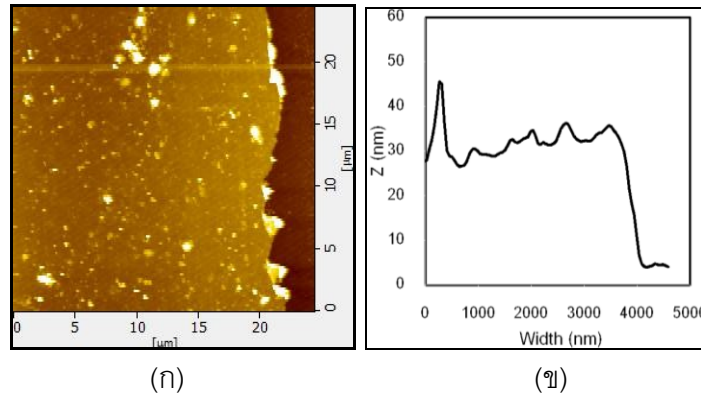
รูปที่ 4.15 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของ (ก) फिल्मบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี फिल्मวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจาก (ข) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนผสมเมทานอล (ค) ร้อยละ 10 และ (ง) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผสมเอทานอล (จ) ร้อยละ 10 และ (ฉ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผสม 1-โพรพานอล (ช) ร้อยละ 10 และ (ซ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และผสม 1-บิวทานอล (ณ) ร้อยละ 10 และ (ญ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

#### 4.4.2 สัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์

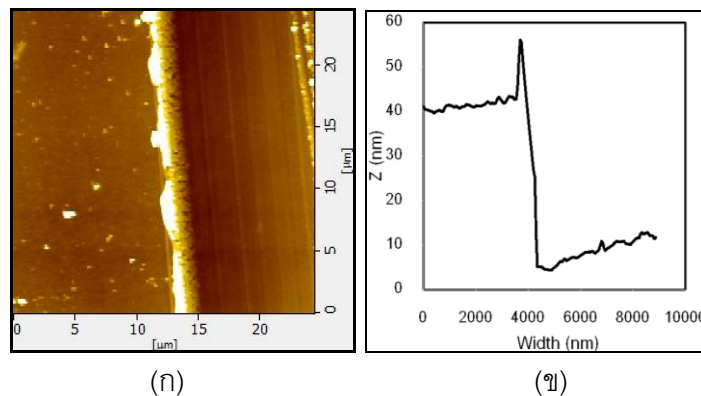
##### 4.4.2.1 การหาความหนาของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

การหาความหนาของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี สามารถทำได้โดยการใช้เข็มปลายแหลมขีดลงบนฟิล์มให้ลึกถึงชั้นของแผ่นควอตซ์สไลด์ จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม เพื่อหาความแตกต่างของความสูงระหว่างชั้นฟิล์มกับควอตซ์สไลด์ซึ่งค่าความต่างที่ได้ นี้ก็จะเป็นความหนาของฟิล์ม โดยในงานวิจัยนี้จะหาความหนาของฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนที่ความเข้มข้นของคอนจูเกตพอลิเมอร์เท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งจากการทดลองพบว่าความหนาของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมได้จะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $37.616 \pm 8.091$  นาโนเมตร ค่าความหนาสูงสุดเท่ากับ 52.230 นาโนเมตร และค่าความหนาดำสุดเท่ากับ 23.110 นาโนเมตร (รูปที่ 4.16) ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม

ไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีจะมีค่าความหนาโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $43.978 \pm 10.361$  นาโนเมตร ค่าความหนาสูงสุดเท่ากับ 57.490 นาโนเมตร และค่าความหนาดำสุดเท่ากับ 25.740 นาโนเมตร (รูปที่ 4.17) แสดงให้เห็นว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบจะมีความหนามากกว่าฟิล์มคอนจุกเกตพอลิเมอร์ ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์จะส่งผลให้ฟิล์มมีความหนามากขึ้น



รูปที่ 4.16 (ก) สัณฐานวิทยาบริเวณรอยขีดและ (ข) Depth profile ของรอยขีดแสดงความหนาของฟิล์มบางคอนจุกเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน

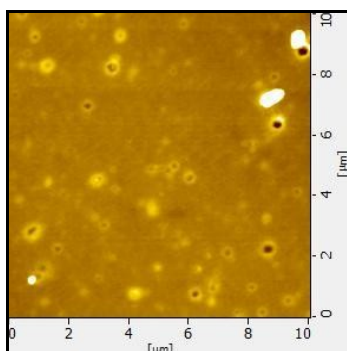


รูปที่ 4.17 (ก) สัณฐานวิทยาบริเวณรอยขีดและ (ข) Depth profile ของรอยขีดแสดงความหนาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน

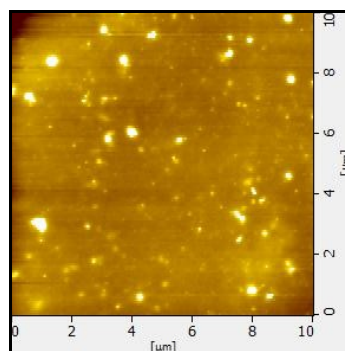


#### 4.4.2.2 สันฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

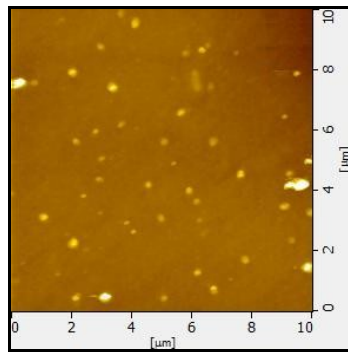
เมื่อวิเคราะห์ลักษณะทางสันฐานวิทยาของฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมพบว่า ฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีจะมีกลุ่มพอลิเมอร์กระจายอยู่ทั่วๆ พื้นผิวของฟิล์มและมีความขรุขระน้อยกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ดังรูปที่ 4.18 (ก) ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนจะมีอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์และกลุ่มของพอลิเมอร์ขนาดค่อนข้างใหญ่กระจายอยู่ทั่วๆ พื้นผิวของฟิล์ม ดังรูปที่ 4.18 (ข) และเมื่อเติมแอลกอฮอล์ชนิดที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้นลงไปในสารแขวนลอยจะส่งผลให้มีขนาดของอนุภาคและกลุ่มของพอลิเมอร์เล็กลงและมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีขึ้นดังรูปที่ 4.18 (ค)-(ง) และมีแนวโน้มว่าความขรุขระของฟิล์มจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของแอลกอฮอล์สูงขึ้น ดังค่าในตารางที่ 4.5 ในทางตรงกันข้ามฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาว (รูปที่ 4.18 (ช)-(ญ)) จะมีอนุภาคและกลุ่มของพอลิเมอร์ขนาดใหญ่กระจายอยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม นอกจากนี้ยังพบหลุมบนฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/1-บิวทานอลด้วย ซึ่งจะพบมากในสัดส่วนของ 1-บิวทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ดังรูปที่ 4.18 (ญ)



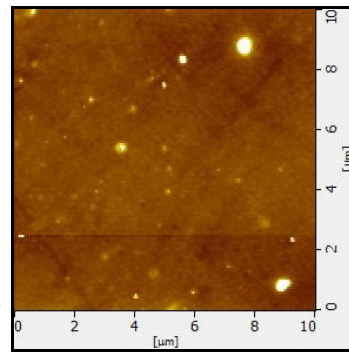
(ก)



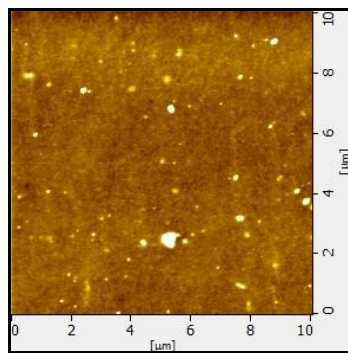
(ข)



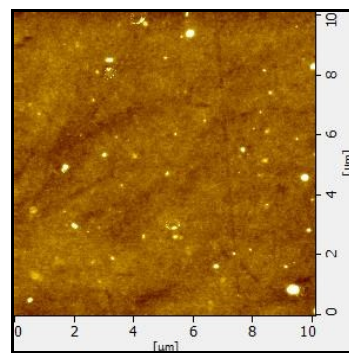
(A)



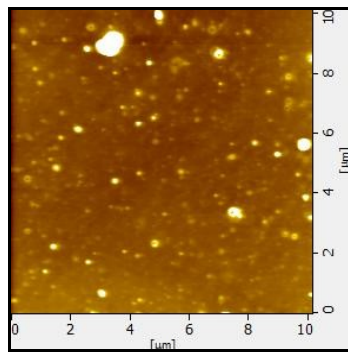
(B)



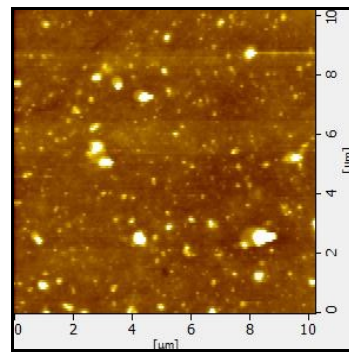
(C)



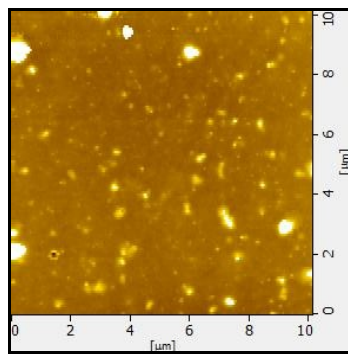
(D)



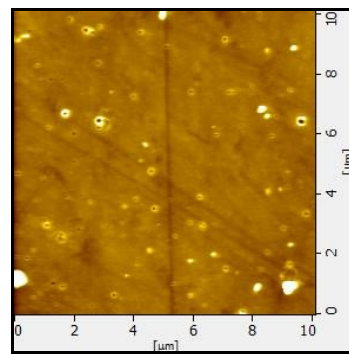
(E)



(F)



(G)



(H)

รูปที่ 4.18 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ (ก) फिल्मบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี फिल्मวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจาก (ข) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนผสมเมทานอล (ค) ร้อยละ 10 และ (ง) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผสมเอทานอล (จ) ร้อยละ 10 และ (ฉ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผสม 1-โพรพานอล (ช) ร้อยละ 10 และ (ซ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และผสม 1-บิวทานอล (ฅ) ร้อยละ 10 และ (ฌ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

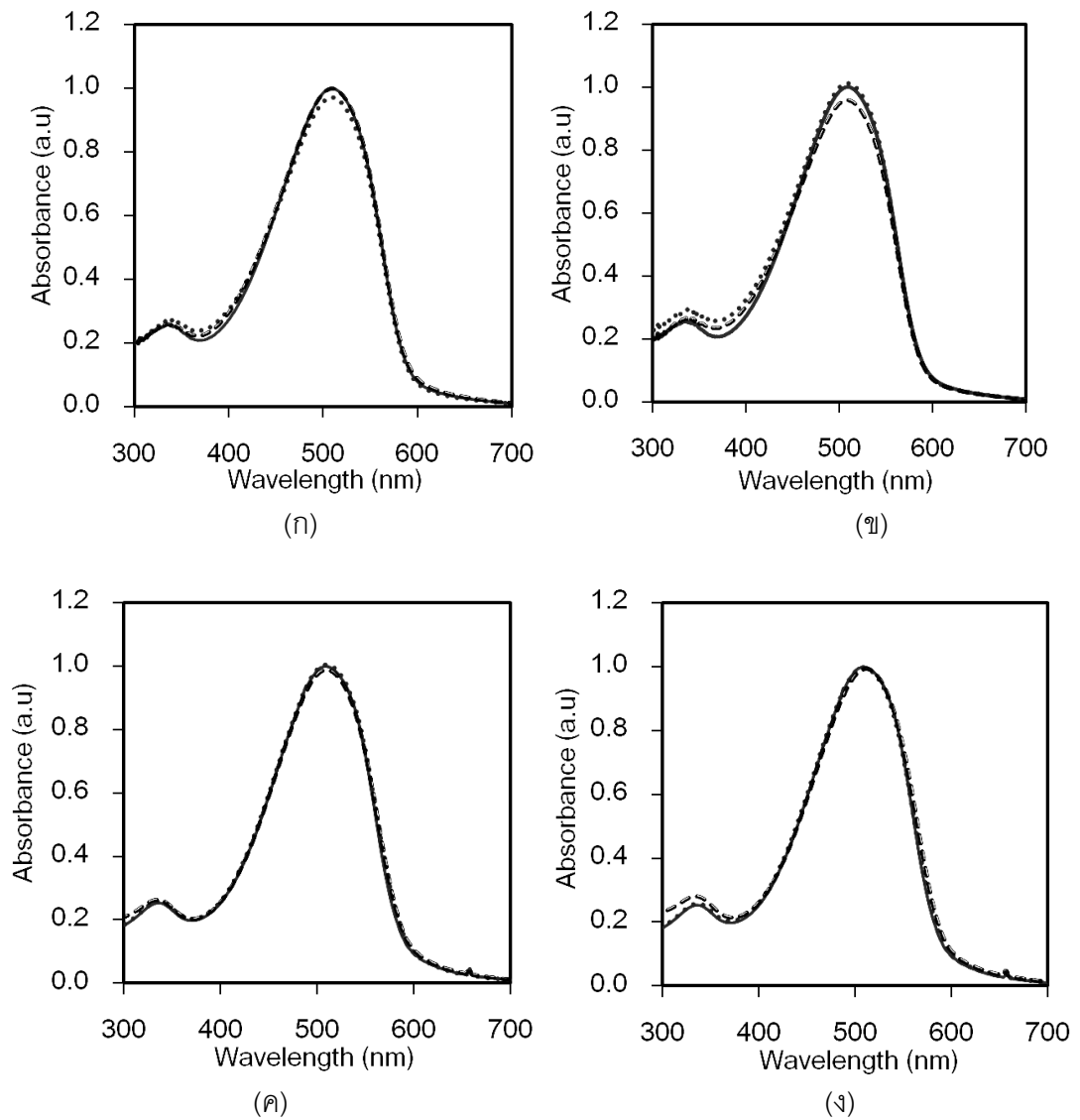
ตารางที่ 4.5 ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

ตัวทำละลาย	สัดส่วนของ แอลกอฮอล์ (%v/v)	ความกว้าง ของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูง ของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
คลอโรเบนซีน	0	115.82±26.18	9.04±7.64	7.91±0.35
คลอโรเบนซีน/ เมทานอล	10	115.73±14.55	6.00±4.33	8.33±0.16
	20	97.83±24.53	5.03±4.14	6.67±1.02
คลอโรเบนซีน/ เอทานอล	10	91.97±25.83	4.66±2.45	4.76±0.07
	20	92.49±21.99	6.85±7.31	4.08±3.38
คลอโรเบนซีน/ 1-โพรพานอล	10	116.49±25.84	7.74±5.66	4.95±1.78
	20	134.34±24.39	2.86±1.11	5.88±1.06
คลอโรเบนซีน/ 1-บิวทานอล	10	111.03±31.43	10.65±9.05	6.35±2.50
	20	118.31±36.01	4.92±3.09	4.52±0.64

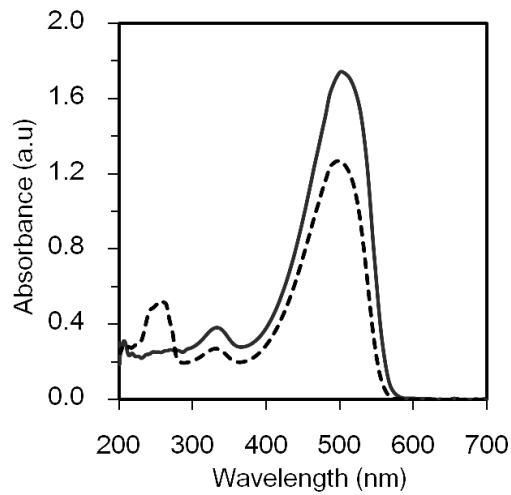
#### 4.4.3 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์

การทดสอบสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของสายโซ่คอนจูเกตพอลิเมอร์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของสารอนินทรีย์/คอนจูเกตพอลิเมอร์ที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยวิธีหมุนสปินแคสตั้งที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที ซึ่งจากการทดลองพบว่า สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ทั้งหมดมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งความสูงและความกว้างของกราฟซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 – 600 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.19

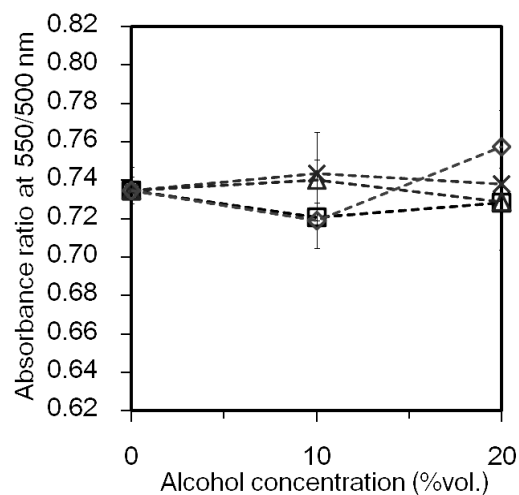
การวิเคราะห์ปริมาณการจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบสามารถหาได้จากการคำนวณสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (aggregation) ต่อการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรซึ่งเป็นตำแหน่งที่สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรือเกิดการม้วนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ (agglomeration) โดยที่ตำแหน่ง 500 นาโนเมตรนี้คือตำแหน่งยอดของการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่ความเข้มข้นต่ำประมาณ 0.002 มิลลิกรัมในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนหรือตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ซึ่งจะแสดงถึงการดูดกลืนแสงของสายโซ่พอลิเมอร์โมเลกุลเดี่ยว (ดังรูปที่ 4.20) โดยจากการทดลองพบว่าการเติมแอลกอฮอล์ลงไปในสารแขวนลอยจะส่งผลต่อตำแหน่งยอดที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดเพียงเล็กน้อยทำให้ค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตรของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.19 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (ก) เมทานอล (ข) เอทานอล (ค) 1-โพรพานอล และ (ง) 1-บิวทานอล ร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

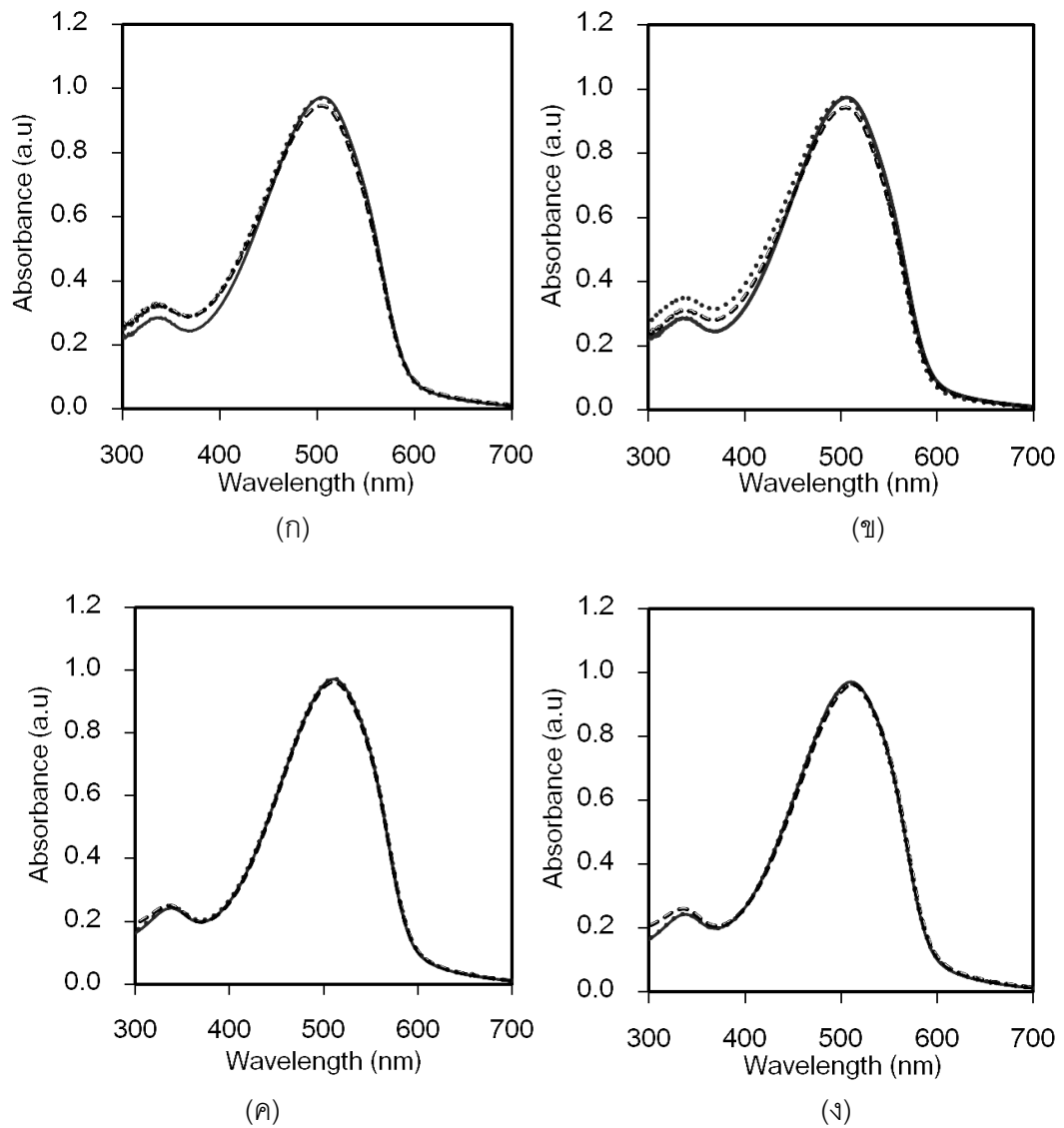


รูปที่ 4.20 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีวีโมเลกุลเดี่ยวในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม (---)



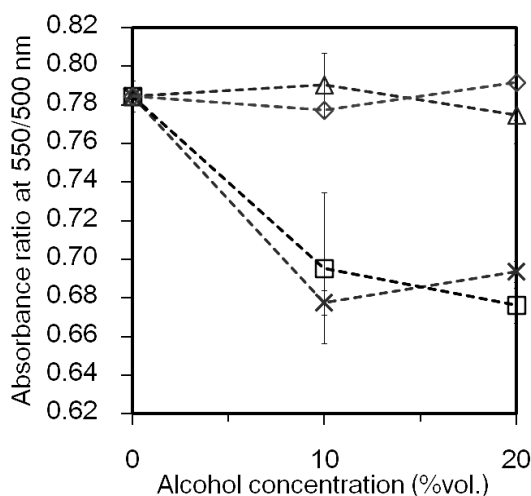
รูปที่ 4.21 สัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีวี ที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ชนิด (x) เมทานอล (□) เอทานอล (△) 1-โพรพานอล และ (◇) 1-บิวทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

จากนั้นนำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีทั้งหมดมาอบในเตาอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของคอนจุกเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี (65 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่งผลให้เกิดการผ่อนคลายและการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งจากการทดลองพบว่า สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ดังรูปที่ 4.22 อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงที่สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตรมาคำนวณพบว่า ค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้น ซึ่งได้แก่ เมทานอลและเอทานอล ที่สัดส่วนของแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตร จะมีค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงลดลง แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแอลกอฮอล์ให้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงจะไม่แตกต่างจากที่สัดส่วนร้อยละ 10 โดยปริมาตรมากนัก ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาว ซึ่งได้แก่ 1-โพรพานอลและ 1-บิวทานอลจะมีค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงค่อนข้างคงที่ในทุกสัดส่วน ดังรูปที่ 4.23 และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงก่อนอบและหลังอบพบว่า ค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้นมีแนวโน้มลดลงหลังจากการอบแล้ว แต่ค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาวมีแนวโน้มคงที่ แสดงให้เห็นถึงสมบัติทางแสงที่เปลี่ยนไปเนื่องจากชนิดของแอลกอฮอล์ในตัวทำละลายผสมและการให้ความร้อนแก่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบซึ่งส่งผลต่อการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่พอลิเมอร์



รูปที่ 4.22 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบโพลิเอทิลีนไดออลอะครีเลต/เอทิลอะครีเลต-พีวีเอที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (ก) เมทานอล (ข) เอทานอล (ค) 1-โพรพานอล และ (ง) 1-บิวทานอล ร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของโพลิเอทิลีนไดออลอะครีเลตร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ





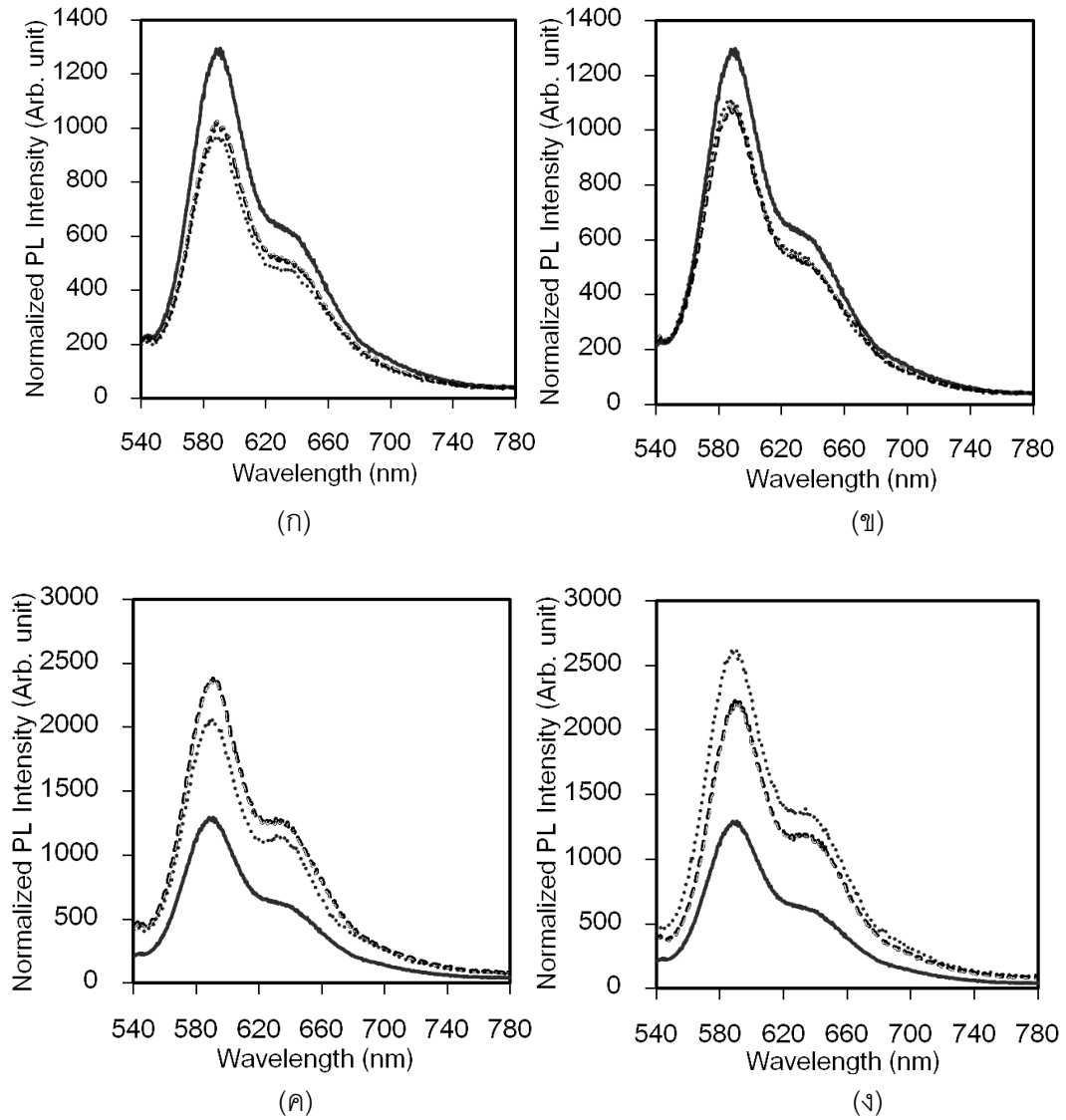
รูปที่ 4.23 สัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ชนิด (×) เมทานอล (⊞) เอทานอล (△) 1-โพรพานอล และ (◆) 1-บิวทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ

#### 4.4.4 สมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์

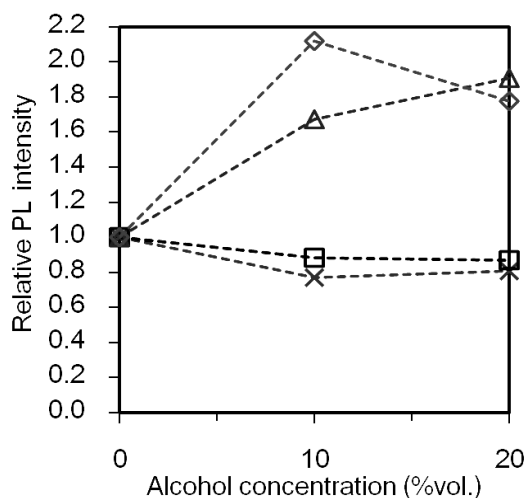
จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการวิเคราะห์สมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปีสามารถแสดงได้ถึงความสามารถและสมบัติในการแยกประจุซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของฟิล์ม โดยที่ฟิล์มที่มีค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่ต่ำจะมีประสิทธิภาพในการแยกประจุที่ดีเนื่องจากเกิดการกลับมารวมตัวกันของประจุน้อย นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมายังได้กล่าวอีกว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของสารอนินทรีย์/คอนจูเกตพอลิเมอร์จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่ต่ำกว่าหรือมีประสิทธิภาพในการแยกประจุที่ดีกว่าฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์ เนื่องจากมีสารอนินทรีย์ที่ทำหน้าที่เสมือนสะพานช่วยให้เกิดการส่งผ่านประจุไปยังขั้วไฟฟ้าได้ง่ายขึ้นและประจุไม่เกิดการกลับมารวมตัวกันอีก<sup>[96]</sup> ซึ่งนอกจากการเติมสารอนินทรีย์ลงไปในฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์แล้วปัจจัยที่ช่วยส่งผลให้ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบมีการแยกประจุที่ดีขึ้นคือการที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบมีการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของสารอนินทรีย์ที่ดีและต่อเนื่อง มีช่องทางสำหรับการลำเลียงประจุ มีขนาดและจำนวนอนุภาคที่เหมาะสม รวมทั้งมีปริมาณการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็น

ระเบียบสูงซึ่งทั้งหมดนี้ได้ทำการศึกษามาในหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะใช้เทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปีในการศึกษาสมบัติเชิงแสงหรือการคายแสงที่มีความสัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ทั้งนี้ค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้จะต้องทำการ normalize ก่อนที่จะนำมาเขียนกราฟเนื่องจากฟิล์มมีความหนาไม่เท่ากัน โดยนำมาเทียบกับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเดียวกันกับความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้นที่ทำให้เกิดการคายแสง เพื่อให้สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

จากการทดลองพบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหมุนสปินเคลสติงจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้น สัดส่วนของแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตร จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้จากการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ต่ำกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน อย่างไรก็ตามก็ดีขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ให้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตรพบว่าค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบมีค่าใกล้เคียงกันกับที่สัดส่วนร้อยละ 10 โดยปริมาตร (รูปที่ 4.24 (ก)-(ข)) ในทางกลับกันฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาว กลับมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงสูงกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (รูปที่ 4.24 (ค)-(ง)) โดยมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพันธ์ซึ่งกันและกันโดยการหาสัดส่วนค่าพื้นที่ใต้กราฟของสเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ต่อค่าพื้นที่ใต้กราฟของสเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนหลังการทำ normalize แล้ว ดังรูปที่ 4.25



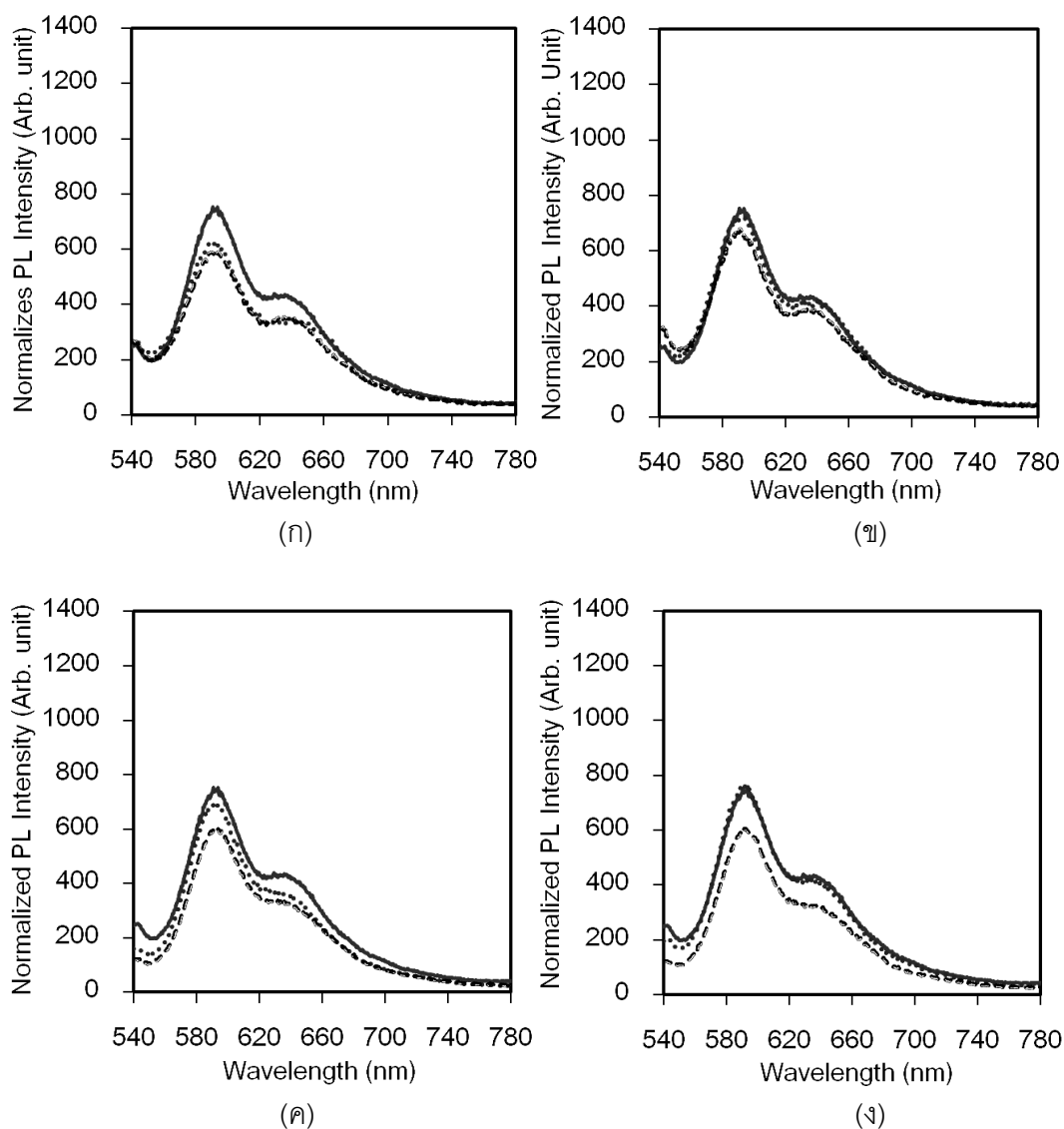
รูปที่ 4.24 สเปกตรากายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (ก) เมทานอล (ข) เอทานอล (ค) 1-โพรพานอล และ (ง) 1-บิวทานอล ร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก



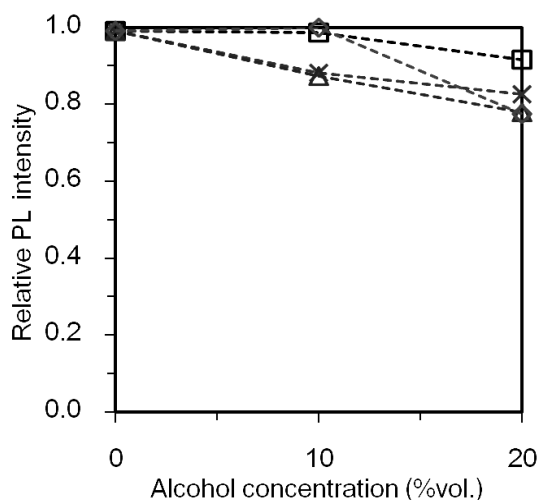
รูปที่ 4.25 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (×) เมทานอล (⊞) เอทานอล (▲) 1-โพรพานอล และ (◇) 1-บิวทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

เมื่อนำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมได้ทั้งหมดไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มก่อนอบ และเมื่อพิจารณาค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์พบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ทั้งหมดจะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงต่ำกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.26 โดยค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่ลดลงมากที่สุดพบในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาว ซึ่งลดลงถึงประมาณร้อยละ 30 จากค่าความเข้มแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนที่วัดได้ ดังรูปที่ 4.27 ซึ่งผลที่ได้หลังอบนี้มีแนวโน้มที่แตกต่างจากผลที่ได้ก่อนอบ ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าแอลกอฮอล์ที่หลงเหลืออยู่ในฟิล์มก่อนอบอาจจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของประจุไปยังขั้วไฟฟ้าจึงทำให้เกิดการแยกประจุได้น้อย และหลังจากอบฟิล์มแล้ว แอลกอฮอล์จะถูกกำจัดออกไปบางส่วนทำให้มีปริมาณแอลกอฮอล์ลดลง ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุที่ง่ายขึ้นและเกิดการแยกประจุที่ดีขึ้น ค่าความเข้มแสงของการคายแสงจึงลดลง ดังนั้นเพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าปริมาณแอลกอฮอล์ที่หลงเหลืออยู่ในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบนั้นลดลงหลังจาก

นำไปอบจริง ทางผู้วิจัยจึงได้นำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ทั้ง 4 ชนิดที่สัดส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตร มาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบปริมาณแอลกอฮอล์ที่หลงเหลืออยู่ในฟิล์มทั้งก่อนอบและหลังอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.26 สเปกตรากายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (ก) เมทานอล (ข) เอทานอล (ค) 1-โพรพานอล และ (ง) 1-บิวทานอล ร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ



รูปที่ 4.27 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม ไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (×) เมทานอล (⊕) เอทานอล (▲) 1-โพรพานอล และ (◇) 1-บิวทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ

#### 4.4.5 การหาปริมาณของแอลกอฮอล์ที่หลงเหลือภายในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์

เนื่องจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.4 พบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม ไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด 1-โพรพานอล และ 1-บิวทานอลมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงสูงกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนซึ่งแสดงถึงการแยกประจุได้น้อย ทังๆ ที่จากผลการทดลองในหัวข้อก่อนหน้านั้นพบว่า สารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมทั้งสองชนิดนี้จะมีขนาดและการกระจายตัวของอนุภาครวมทั้งสมบัติการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกับสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและมีแนวโน้มที่ค่อนข้างดีกว่าด้วย ทางผู้วิจัยจึงได้ตั้งสมมติฐานว่า สาเหตุน่าจะเกิดจากการตกค้างของแอลกอฮอล์ภายในฟิล์มเนื่องจากแอลกอฮอล์ทั้งสองชนิดนี้มีจุดเดือดที่สูง โดยที่ 1-โพรพานอลมีจุดเดือดอยู่ในช่วง 96.5 – 98 องศาเซลเซียส และ 1-บิวทานอลมีจุดเดือดเท่ากับ 117 องศาเซลเซียส ในขณะที่เมทานอลและเอทานอลมีจุดเดือดเท่ากับ 64.5 และ 78.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งแอลกอฮอล์ที่หลงเหลืออยู่ในฟิล์มอาจจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของประจุได้ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองโดยนำสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบ

ไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ทั้ง 4 ชนิด ที่สัดส่วนของแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 20 โดยปริมาตรเพื่อให้เห็นความแตกต่างของ ปริมาตรของแอลกอฮอล์ทั้งก่อนอบและหลังอบอย่างชัดเจน มาขึ้นรูปด้วยวิธีการหมุนสปินแคสตั้ง ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาทีบนแผ่นกระจกสไลด์ จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาชุบให้เป็นผงแล้ว นำไปอัดขึ้นรูปด้วยวิธี KBr pellet และนำมาทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งจะ พบพีคการสั่นของพันธะของโมเลกุลที่อยู่ในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่ช่วงความถี่ต่างๆ ดังต่อไปนี้ ที่ ช่วงความถี่ประมาณ 400 เซนติเมตร<sup>-1</sup> จะพบพีคแหลมที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นพีคการสั่นแบบยืด (stretching) ของพันธะ Ti-O-Ti ที่ช่วงความถี่ประมาณ 800 เซนติเมตร<sup>-1</sup> จะพบพีคการสั่นแบบยืด ของพันธะ C-Cl ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและพีคการสั่นแบบงอ (bending) ของพันธะ C-H ในคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่ช่วงความถี่ประมาณ 1000 เซนติเมตร<sup>-1</sup> จะพบพีคการสั่น แบบยืดของพันธะ C-O ในแอลกอฮอล์และคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่ช่วงความถี่ ประมาณ 1400 – 1600 เซนติเมตร<sup>-1</sup> จะพบพีคการสั่นแบบยืดของ C-C ในวงแหวนอะโรมาติกซึ่ง พบในคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีและตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ที่ช่วงความถี่ประมาณ 1450 เซนติเมตร<sup>-1</sup> จะพบพีคการสั่นแบบงอของหมู่ CH<sub>2</sub> และ CH<sub>3</sub> ซึ่งมีอยู่ในแอลกอฮอล์และ คอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่ช่วงความถี่ประมาณ 2800 – 3000 เซนติเมตร<sup>-1</sup> จะพบพีคการ สั่นแบบยืดของพันธะ C-H ซึ่งพบในแอลกอฮอล์และคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่ช่วง ความถี่ประมาณ 3060 เซนติเมตร<sup>-1</sup> จะพบพีคการสั่นแบบยืดของพันธะ C-H ในวงแหวนอะโรมาติก ซึ่งพบในคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีและตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และที่ช่วงความถี่ ประมาณ 3000 – 3500 เซนติเมตร<sup>-1</sup> จะพบการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H ซึ่งพบในแอลกอฮอล์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ ส่วนพีคอื่นๆ ที่ปรากฏมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.6 <sup>[97], [98]</sup> จาก กราฟจะเห็นได้ว่า พีคการสั่นของพันธะ Ti-O-Ti ที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400 เซนติเมตร<sup>-1</sup> นั้นไม่ตรงกับพีคใดๆ ของสารเคมีอื่นๆ เลย ดังนั้นจะใช้ความสูงของพีค ณ ตำแหน่งนี้ในการทำ normalize เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบปริมาตรของแอลกอฮอล์ได้ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าที่ช่วง ความถี่ประมาณ 3000 – 3500 เซนติเมตร<sup>-1</sup> นั้นตรงกับพีคการสั่นของพันธะ O-H ซึ่งมีทั้งใน แอลกอฮอล์และไทเทเนียมไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้ทางผู้วิจัยได้เตรียมสาร แขนงลอยที่นำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มให้มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากันคือร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงถือว่าความแตกต่างของความสูงของพีคที่ช่วงความถี่นี้จะเกิดจากความ แตกต่างของปริมาตรของแอลกอฮอล์เท่านั้น

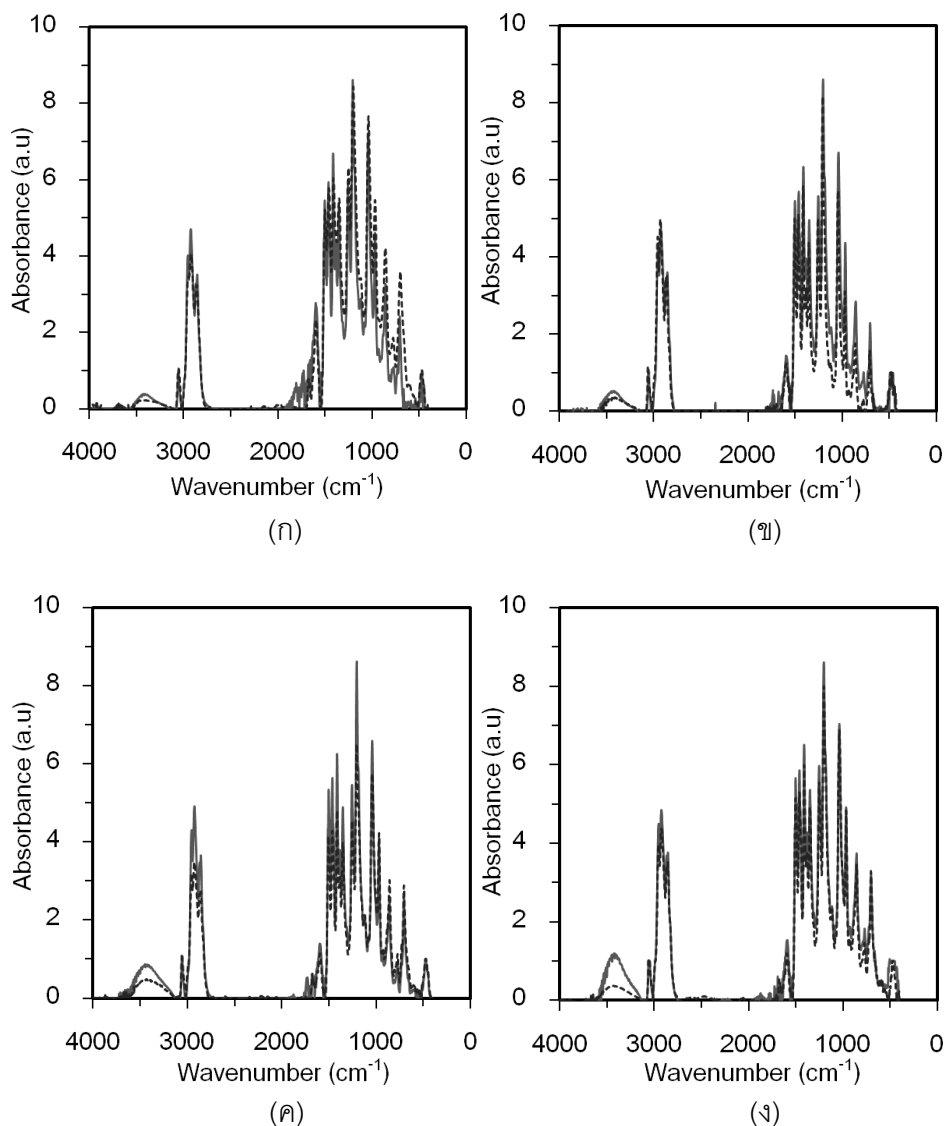
เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแอลกอฮอล์ก่อนอบและหลังอบพบว่า ความแตกต่างระหว่าง ความสูงของพีคในช่วงการสั่น O-H หรือที่ช่วงความถี่ประมาณ 3000 – 3500 เซนติเมตร<sup>-1</sup> ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีก่อนอบและหลังอบจะแปรผันตามจุดเดือดของแอลกอฮอล์ นั่นคือในฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีจุดเดือดสูง ความสูงของพีคหลังอบก็จะลดลงมาก ซึ่งสามารถแสดงลำดับความสูงของพีคที่ลดลงจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ 1-บิวทานอล > 1-โพรพานอล > เอทานอล > เมทานอล ดังรูปที่ 4.28 ในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดเมทานอลและเอทานอลจะมีความสูงของพีคหลังอบลดลงจากก่อนอบไม่มากนัก เนื่องจากแอลกอฮอล์ทั้งสองชนิดนี้มีจุดเดือดที่ต่ำ ทำให้ระเหยได้ง่ายและอาจเกิดการระเหยไปบางส่วนตั้งแต่ขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยวิธีการหมุนสปินเคลสตั้งแล้ว ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด 1-โพรพานอลและ 1-บิวทานอลจะมีความสูงของพีคหลังอบลดลงจากก่อนอบมากเนื่องจากมีจุดเดือดสูงทำให้สามารถระเหยได้ช้า ดังนั้นก่อนอบจึงมีปริมาณของแอลกอฮอล์อยู่มาก และเมื่อทำการอบแล้วแอลกอฮอล์บางส่วนก็จะถูกกำจัดออกไป

ตารางที่ 4.6 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สารเคมี	cm <sup>-1</sup>	หมู่ฟังก์ชัน/รายละเอียด
TiO <sub>2</sub>	400-850	Ti-O-Ti stretching
	3000-3500	O-H stretching
MEH-PPV	3058	C-H aromatic ring stretching
	2957	asymmetrical CH <sub>3</sub> stretching
	2927	C-H stretching
	2858	CH <sub>2</sub> stretching
	1590, 1504 และ 1413	C-C aromatic ring semicircular stretching
	1463	asymmetrical alkyl CH <sub>2</sub> stretching
	1381	symmetrical alkyl CH <sub>2</sub> stretching



สารเคมี	cm <sup>-1</sup>	หมู่ฟังก์ชัน/รายละเอียด
MEH-PPV	1254 1204 1040 967 854 703	C-O ether stretching C-O phenyl-oxygen stretching C-O alkyl-oxygen stretching C-H vinylyne wagging C-H phenyl out-of-plane wagging C-H aromatic ring bending
คลอโรเบนซีน	~3060 1600-1400 ~1000-1100 800-700	C-H aromatic ring stretching C-C aromatic ring stretching C-H in-plane bending C-Cl stretching
เมทานอล	3200-3550 2970-2950 2880-2860 1470-1430 1450-1375 1050 590-720	O-H (H-bonded) stretching asymmetrical C-H stretching symmetrical C-H stretching asymmetrical C-H bending CH <sub>3</sub> bending C-O stretching O-H out-of-plane bending
เอทานอล, 1-โพรพานอล, 1-บิวทานอล	3200-3550 2970-2950 2880-2860 1470-1430 1465-1450 1450-1375 1050 590-720	O-H (H-bonded) stretching asymmetrical C-H stretching symmetrical C-H stretching asymmetrical C-H bending CH <sub>2</sub> bending CH <sub>3</sub> bending C-O stretching O-H out-of-plane bending



รูปที่ 4.28 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (ก) เมทานอล (ข) เอทานอล (ค) 1-โพรพานอล และ (ง) 1-บิวทานอล ที่สัดส่วนของแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 20 โดยปริมาตร (—) ก่อนอบและ (---) หลังอบ

จากผลการศึกษสมบัติทางกายภาพและทางแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก พบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้มีลักษณะของพื้นผิวที่เรียบ ไม่มีรอยแตกหรือหลุม และมีการกระจายตัวของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ที่ดีและใกล้เคียงกันทั้งหมด ในขณะที่ผลของ

สมบัติการดูดกลืนแสงพบว่า การเติมแอลกอฮอล์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์น้อยมากหรือแทบจะไม่มีผลเลย และเนื่องจากการเตรียมที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากัน ดังนั้นสมบัติการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบจึงน่าจะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยเท่านั้น ซึ่งจากผลของสมบัติการคายแสงของฟิล์มพบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้นๆ จะมีความเข้มแสงของการคายแสงลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากการเติมแอลกอฮอล์ช่วยให้อนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ดังแสดงได้จากผลการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคในสารแขวนลอยที่ศึกษาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม โดยการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีขึ้นนี้จะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองเฟสมากขึ้น จึงทำให้เกิดการแยกประจุที่ดีขึ้น และเกิดการกลับมารวมตัวกันของประจุน้อยลง ค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้จึงลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มสัดส่วนของแอลกอฮอล์ให้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตรกลับพบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงมีค่าใกล้เคียงกันกับที่สัดส่วนร้อยละ 10 โดยปริมาตร ทั้งนี้เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่การใช้ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาวจะทำให้ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการตกค้างของแอลกอฮอล์ภายในฟิล์มที่ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของประจุจึงทำให้เกิดการแยกประจุน้อยลง

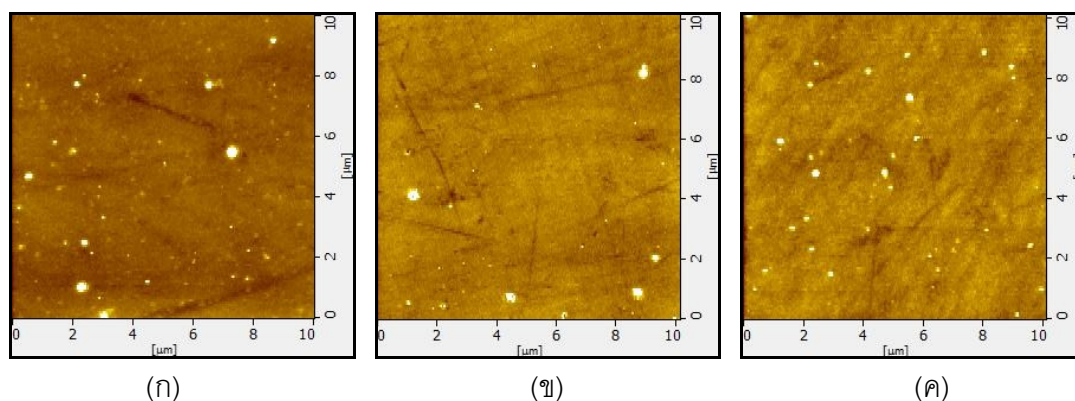
#### 4.5 การศึกษาผลของสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเพิ่มสัดส่วนของอนุภาคระดับนาโนของสารอนินทรีย์ในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอนุภาคระดับนาโนของสารอนินทรีย์/คอนจูเกตพอลิเมอร์จะส่งผลให้สมบัติการแยกและลำเลียงประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบดีขึ้น<sup>[3]</sup>,<sup>[81]</sup> ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของสัดส่วนโดยปริมาตรระหว่างอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์และคอนจูเกตพอลิเมอร์ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบทั้งสมบัติทางกายภาพและทางแสง เพื่อให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ โดยจะมุ่งเน้นศึกษาเฉพาะการใช้เมทานอลเป็นสารเติมแต่งเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาในหัวข้อ 4.4.4 ที่ผ่านมามีพบว่า การใช้แอลกอฮอล์

ชนิด 1-โพรพานอลและ 1-บิวทานอล เป็นสารเติมแต่งมีปัญหาเรื่องการตกค้างของแอลกอฮอล์ นอกจากนี้การใช้เอทานอลก็ยังให้ผลที่ใกล้เคียงกับการใช้เมทานอลอีกด้วย

#### 4.5.1 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ

จากการศึกษาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมพบว่า สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 9.04 โดยปริมาตร จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบและไม่มีความต่อเนื่องกันของอนุภาค เนื่องจากมีปริมาณของอนุภาคน้อย และเมื่อมีการเติมเมทานอลลงไปจะช่วยให้อนุภาคกระจายตัวได้ดีขึ้น และมีขนาดความกว้างของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ที่วัดได้ลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเมทานอลให้สูงขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 กลับไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังรูปที่ 4.29 โดยขนาดความกว้างของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง  $84.06 \pm 21.61$  ถึง  $100.92 \pm 25.55$  นาโนเมตร และความขรุขระของฟิล์มอยู่ในช่วง  $2.56 \pm 1.23$  ถึง  $3.20 \pm 0.14$  นาโนเมตร ดังตารางที่ 4.7

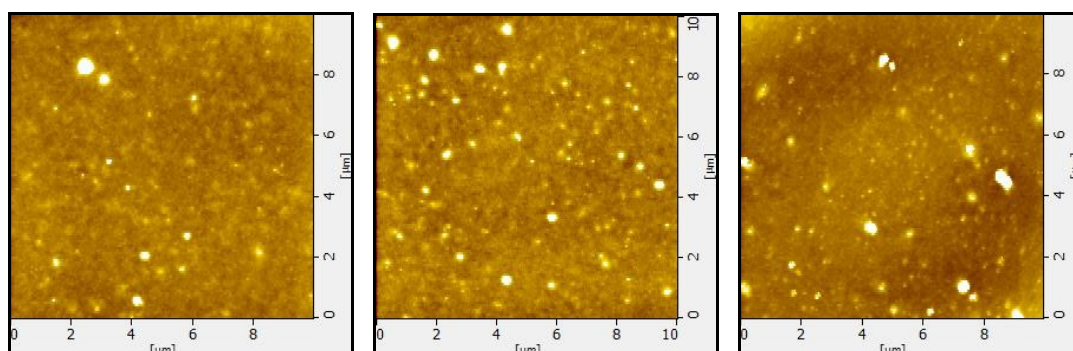


รูปที่ 4.29 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจาก (ก) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (ข) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.7 ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก

ตัวทำละลาย	สัดส่วนของแอลกอฮอล์ (%v/v)	ความกว้างของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูงของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
คลอโรเบนซีน	0	100.92±25.55	3.78±2.12	2.51±1.23
คลอโรเบนซีน/ เมทานอล	10	84.56±20.75	4.42±3.09	2.99±0.12
	20	84.06±21.61	2.36±1.28	3.20±0.14

เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่มีปริมาณของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนพบว่า มีกลุ่มของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์กระจายทั่วไปบนผิวของฟิล์มทั้งหมด โดยที่เมื่อมีการเติมเมทานอลลงไปในสารแขวนลอยที่สัดส่วนร้อยละ 10 โดยปริมาตร จะทำให้มีการกระจายตัวของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ขนาดเล็กๆ มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลเป็นร้อยละ 20 กลับไม่พบความแตกต่างมากนัก ดังรูปที่ 4.30 โดยจะมีค่าขนาดความกว้างและความสูงของอนุภาคบนฟิล์มและความขรุขระของฟิล์มใกล้เคียงกันทั้งหมด ดังตารางที่ 4.8



(ก)

(ข)

(ค)

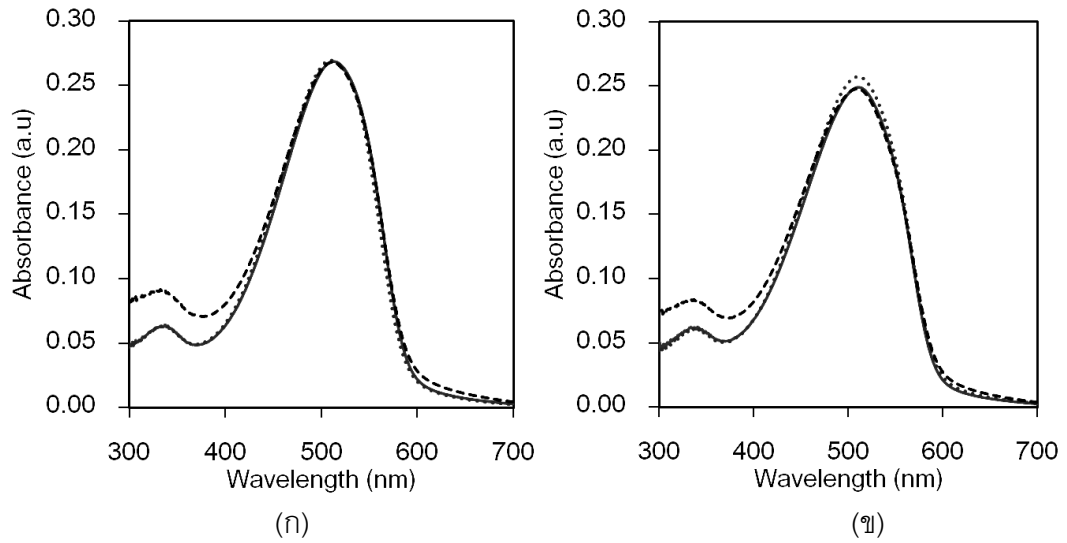
รูปที่ 4.30 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจาก (ก) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (ข) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.8 ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก

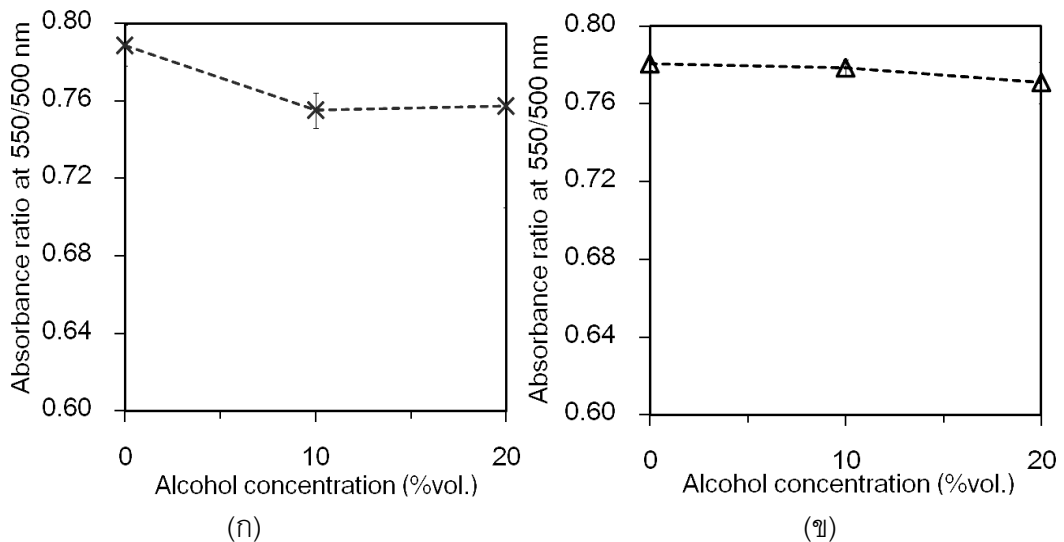
ตัวทำละลาย	สัดส่วนของแอลกอฮอล์ (%v/v)	ความกว้างของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูงของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
คลอโรเบนซีน	0	105.75±21.04	2.75±1.74	2.72±1.65
คลอโรเบนซีน/ เมทานอล	10	100.69±22.11	2.88±1.04	2.05±1.14
	20	101.04±18.97	3.10±1.26	2.66±0.06

#### 4.5.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ

การศึกษาฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีพบว่าสเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ทั้งหมดมีลักษณะคล้ายคลึงกันและมีความสูงของกราฟเท่ากัน ดังรูปที่ 4.31 (ก) และเมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณการจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์โดยการคำนวณสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ระหว่างฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลพบว่า การเติมเมทานอลลงไปในสารแขวนลอยจะส่งผลต่อตำแหน่งยอดที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดทำให้สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและจะมีค่าคงที่เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลมากขึ้น ดังรูปที่ 4.32 (ก) ต่อมาเมื่อพิจารณาถึงผลหลังอบที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ภายในฟิล์มเกิดการผ่อนคลายและเกิดการการจัดเรียงตัวใหม่พบว่าลักษณะสเปกตรากการดูดกลืนแสงไม่แตกต่างกันไปจากตอนก่อนอบ โดยที่สัดส่วนของเมทานอลเท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตรจะมีความสูงของพีคมากกว่าสัดส่วนอื่นๆ เล็กน้อย ดังรูปที่ 4.31 (ข) และสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตรเมื่อมีการเติมเมทานอลลงไปจะมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่โดยรวมแล้วถือว่าค่อนข้างคงที่ ดังรูปที่ 4.32 (ข) และเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตรของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบทั้งก่อนอบและหลังอบพบว่ามีความใกล้เคียงกัน



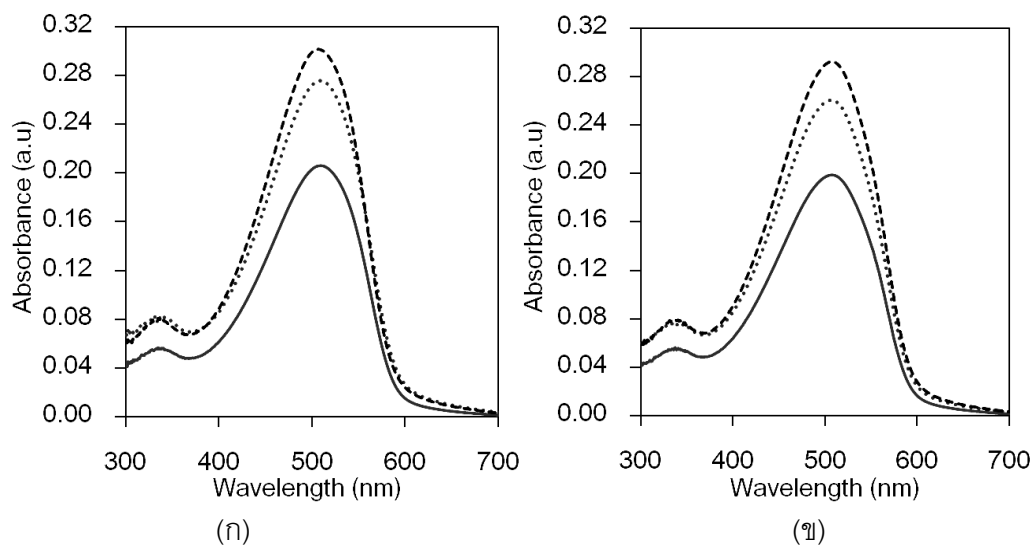
รูปที่ 4.31 สเปกตรากการดูดกลืนแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก



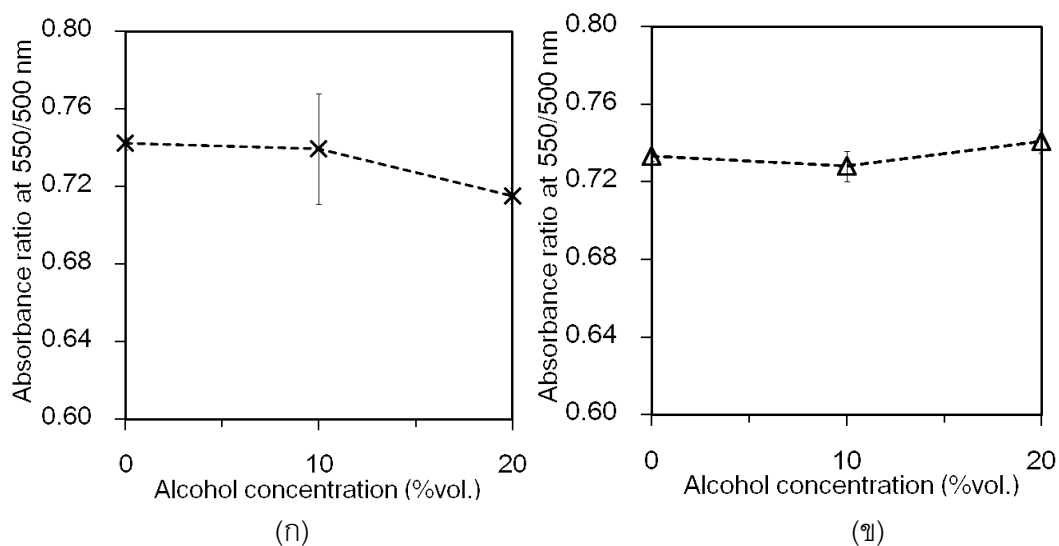
รูปที่ 4.32 สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก



การศึกษาฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก พบว่า สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ทั้งหมดมีลักษณะคล้ายคลึงกันแต่ความสูงของกราฟจะไม่เท่ากัน ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 และ 13.21 โดยน้ำหนัก โดยสเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลจะมีความสูงกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนอย่างชัดเจน และจะมีการดูดกลืนแสงที่มากขึ้นเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.33 (ก) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณการจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์โดยการคำนวณสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ระหว่างฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลพบว่า การเติมเมทานอลส่งผลให้ค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 4.34 (ก) ต่อมาเมื่อพิจารณาการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่พอลิเมอร์ภายในฟิล์มหลังอบพบว่า ลักษณะของสเปกตรากการดูดกลืนแสงไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากตอนก่อนอบ ดังรูปที่ 4.33 (ข) และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตรของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบทั้งก่อนอบและหลังอบ (รูปที่ 4.34 (ข)) พบว่ามีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.33 สเปกตรากการดูดกลืนแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาตรของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก

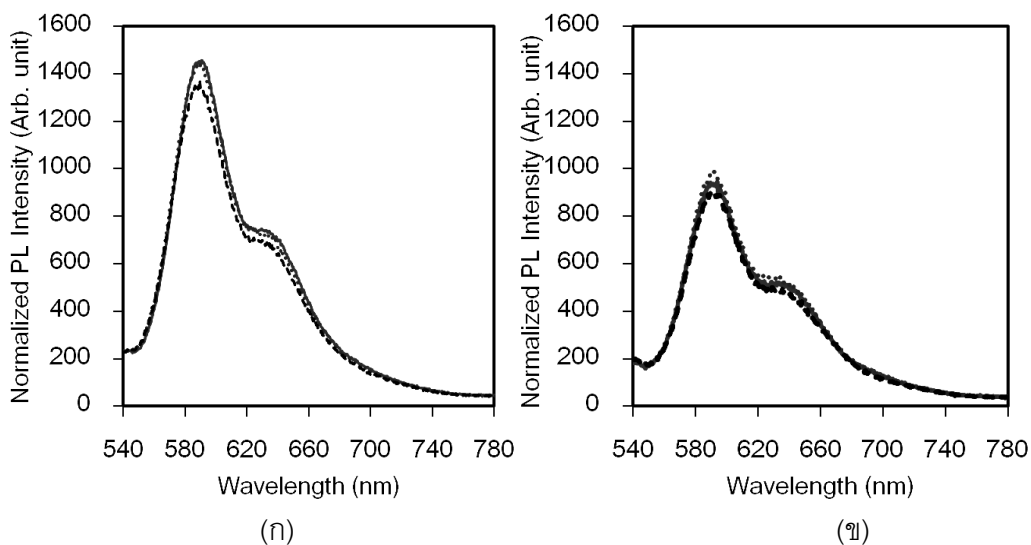


รูปที่ 4.34 สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาตรของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก

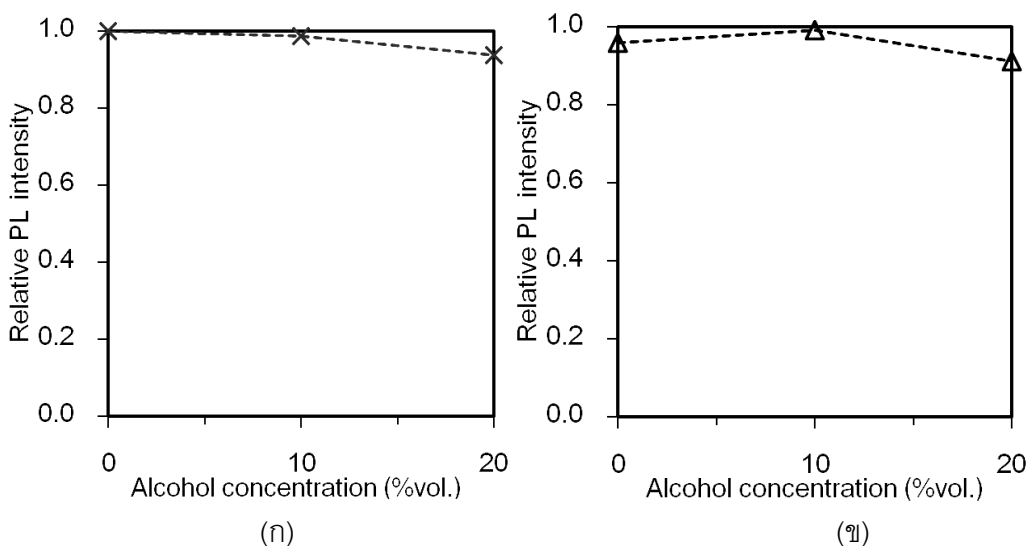
อย่างไรก็ดี จากการทดสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยทั้ง 3 สัดส่วน ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์พบว่า เมื่อมีการเติมแอลกอฮอล์ชนิดเมทานอลลงไปในสารแขวนลอยจะส่งผลต่อการเปลี่ยนตำแหน่งของยอดที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดเพียงเล็กน้อย ทำให้ค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตรที่คำนวณได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อทำการอบฟิล์มเพื่อศึกษาการเกิดการพ่นเคลือบของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่พบว่า สัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ที่สูงขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพในการแยกและลำเลียงประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีจะขึ้นอยู่กับปริมาณและการกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่านั้น

#### 4.5.3 สมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ

ค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปีโดยการกระตุ้นด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนักในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และจะมีค่าลดลงเมื่อมีสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลในตัวทำละลายผสมสูงขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 ดังรูปที่ 4.35 (ก) โดยที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลเท่ากับร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะมีค่าลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนประมาณร้อยละ 7 ดังรูปที่ 4.36 (ก) หลังจากนั้นนำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงซึ่งพบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบหลังอบ (รูปที่ 4.35 (ข)) จะมีค่าลดลงจากค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มก่อนอบ เนื่องจากหลังอบจะมีการกำจัดแอลกอฮอล์ออกไปบางส่วน อย่างไรก็ตามค่าการคายแสงของฟิล์มทั้งหมดที่เตรียมที่สัดส่วนนี้จะมีค่าใกล้เคียงกันและค่อนข้างคงที่ (รูปที่ 4.36 (ข))

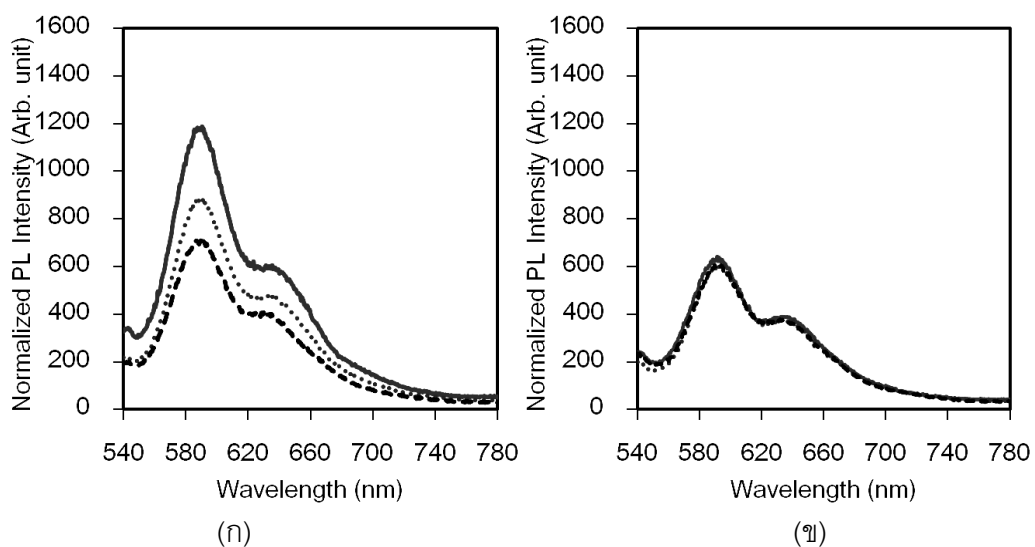


รูปที่ 4.35 สเปกตรากการคายแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก

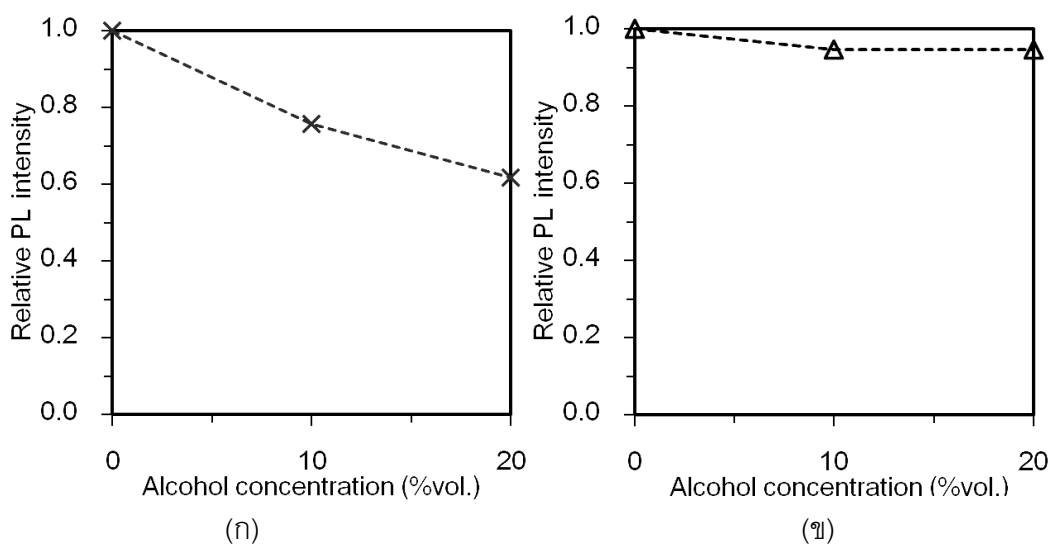


รูปที่ 4.36 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพันธ์ (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก

ค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปีโดยการกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนักในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร จะมีค่าต่ำกว่าฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยในตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน และจะมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลในตัวทำละลายผสมสูงขึ้น เป็นร้อยละ 20 ดังรูปที่ 4.37 (ก) โดยที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลเท่ากับร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะมีค่าลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีนประมาณร้อยละ 35 ดังรูปที่ 4.38 (ก) หลังจากนั้นนำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงซึ่งพบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบหลังอบจะมีค่าต่ำกว่าค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มก่อนอบมาก โดยที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 และ 20 โดยปริมาตร จะมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน ดังรูปที่ 4.37 (ข) คือมีค่าลดลงเพียงประมาณร้อยละ 5 เท่านั้น (รูปที่ 4.38 (ข))



รูปที่ 4.37 สเปกตรากายแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก

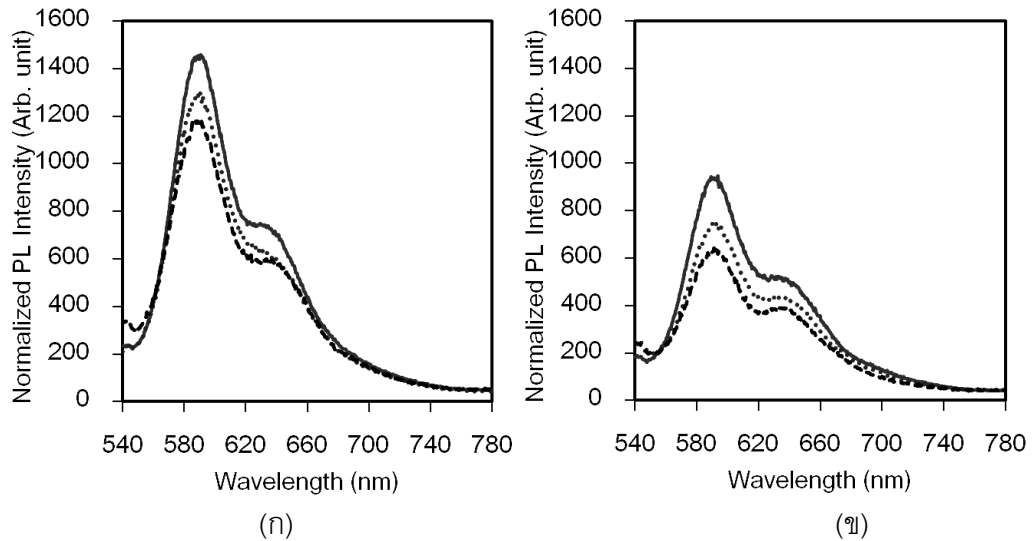


รูปที่ 4.38 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพันธ์ (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก

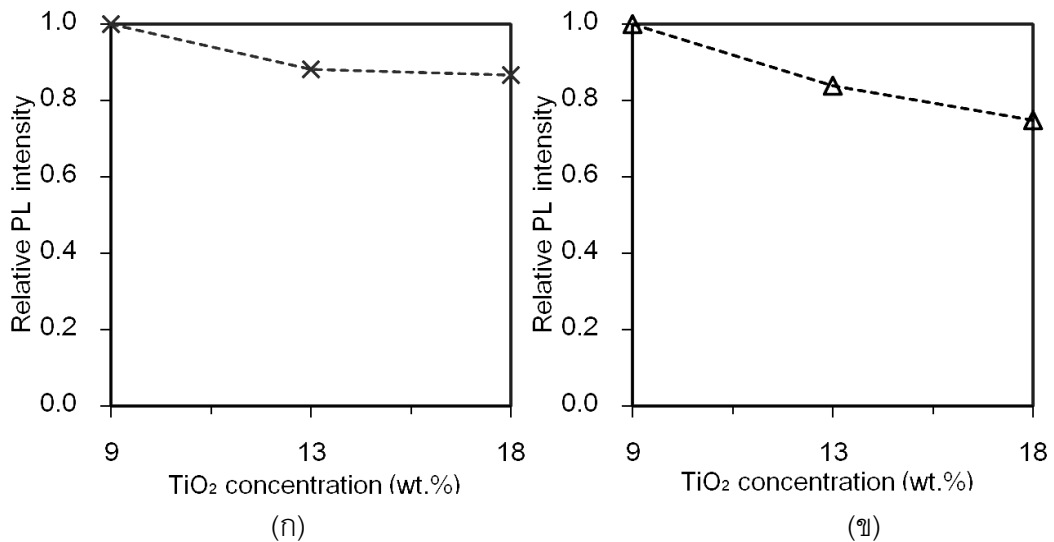
เมื่อพิจารณาผลของการใช้แอลกอฮอล์เป็นสารเติมแต่งในการช่วยกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีพบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกรองเท่ากับร้อยละ 9.04 และ 13.21 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความเข้มของการคายแสงใกล้เคียงกันทั้งในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล โดยที่เมื่อเพิ่มปริมาตรของเมทานอลให้สูงขึ้นค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้จะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นผลของแอลกอฮอล์ต่อการช่วยกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์สองสัดส่วนนี้จึงไม่ชัดเจน เนื่องจากมีปริมาณของอนุภาคน้อย อนุภาคจึงกระจายตัวได้ดีอยู่แล้ว ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังกรองเท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลสูงขึ้น การที่ผลของแอลกอฮอล์ในการเป็นสารช่วยกระจายตัวของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยเห็นได้ชัดเจนที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีปริมาณของอนุภาคในสารแขวนลอยมาก ส่งผลให้อนุภาคมีการจัดเรียงตัว (packing) ภายในระบบที่ชิดกันและเกิดการเกาะตัวกันของอนุภาคมาก ดังนั้นผลของแอลกอฮอล์ในการช่วยแยกอนุภาคให้เคลื่อนที่ออกจากกันจึงเห็นได้ชัด

ต่อมาได้ทำการศึกษาโดยเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ กัน โดยในระบบของคลอโรเบนซีนพบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีก่อนอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนักจะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงสูงสุด ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก จะมีค่าใกล้เคียงกันกับที่ปริมาณร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.39 (ก) โดยมีค่าลดลงจากที่ปริมาณร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 15 ดังรูปที่ 4.40 (ก) ในขณะที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีหลังอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะมีค่าต่ำกว่าก่อนอบและมีค่าลดลงเมื่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.39 (ข) โดยที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์

เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลงจากที่ปริมาณร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ประมาณร้อยละ 25 ดังรูปที่ 4.40 (ข)



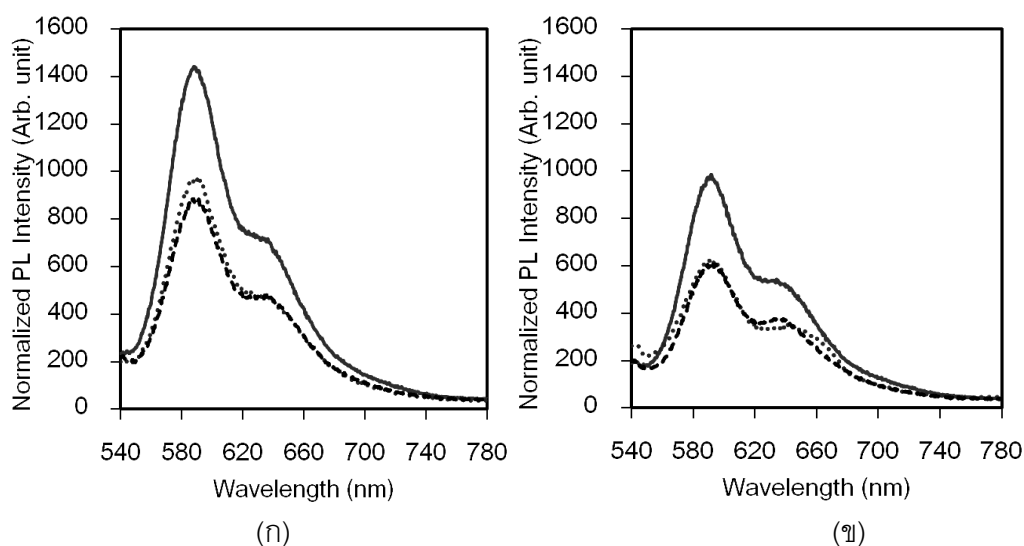
รูปที่ 4.39 สเปกตรากการคายแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอมอีเอส-พีวีทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 (—) 13.21 (•••) และ 18.16 (---) โดยน้ำหนัก



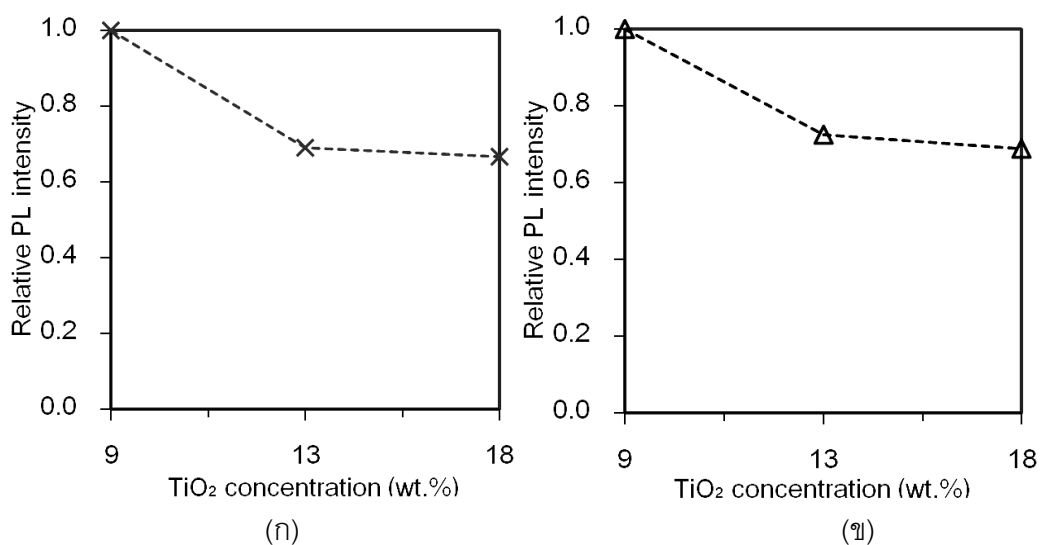
รูปที่ 4.40 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพันธ์ (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอมอีเอส-พีวีทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ



ในระบบของตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร พบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงสูงสุดและจะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลงมากเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ปริมาณร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.41 (ก) โดยมีค่าลดลงจากที่ปริมาณร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนักประมาณร้อยละ 35 ดังรูปที่ 4.42 (ก) ในขณะที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีหลังอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะมีค่าต่ำกว่าก่อนอบ อย่างไรก็ตามแนวโน้มการลดลงของค่าความเข้มแสงในการคายแสงจะมีลักษณะเช่นเดียวกับก่อนอบคือ มีค่าความเข้มของการคายแสงลดลงมากเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนักซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ปริมาณร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.41 (ข) โดยที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลงจากที่ปริมาณร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ประมาณร้อยละ 30 ดังรูปที่ 4.42 (ข)

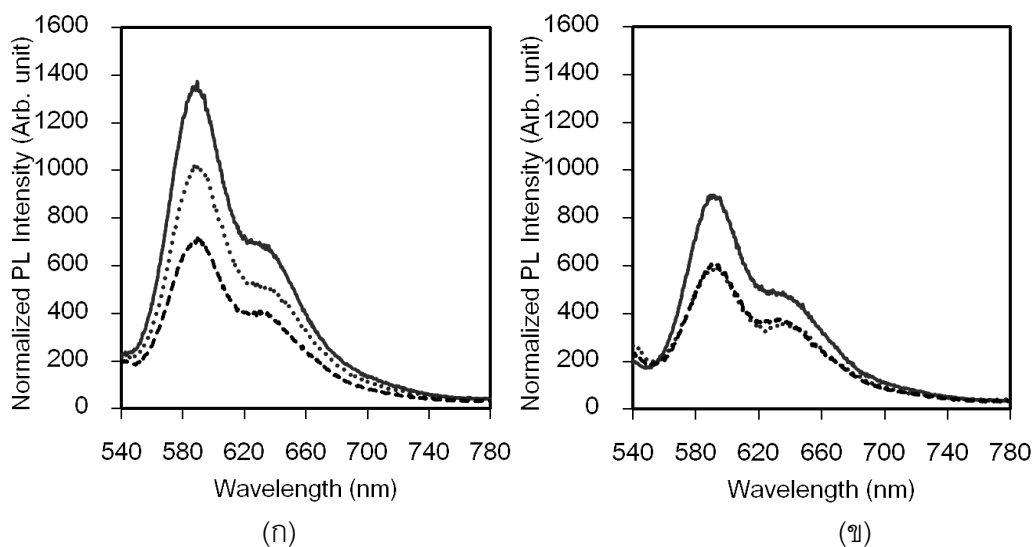


รูปที่ 4.41 สเปกตรากการคายแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 (—) 13.21 (•••) และ 18.16 (---) โดยน้ำหนัก

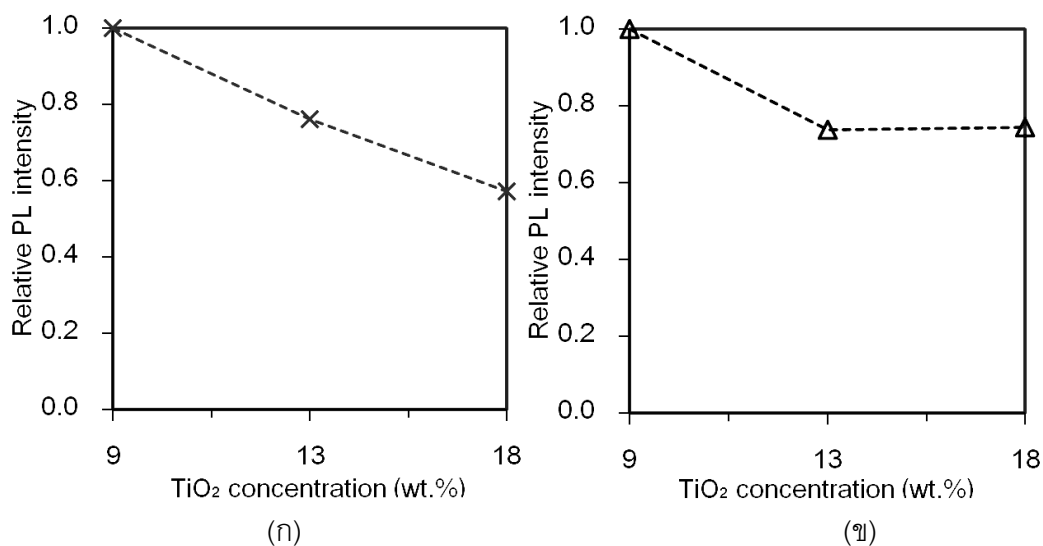


รูปที่ 4.42 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ

ในระบบของตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร พบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงสูงสุดโดยที่ค่าความเข้มของการคายแสงจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.43 (ก) นั่นคือที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลงจากที่ปริมาณร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ประมาณร้อยละ 45 ดังรูปที่ 4.44 (ก) ในขณะที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบหลังจากอบแล้วจะมีค่าลดลงจากก่อนอบ โดยที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความเข้มของการคายแสงสูงสุดและจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 13.21 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่ปริมาณร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.43 (ข) โดยที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลงจากที่ปริมาณร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ประมาณร้อยละ 25 ดังรูปที่ 4.44 (ข)



รูปที่ 4.43 สเปกตรากการคายแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 (—) 13.21 (•••) และ 18.16 (---) โดยน้ำหนัก

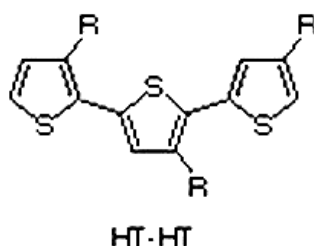


รูปที่ 4.44 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพันธ์ (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ

จากการศึกษาในระบบของคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่มีตัวทำละลายหลักเป็นคลอโรเบนซีนพบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้จากเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปีโดยการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ พบว่า ฟิล์มที่เตรียมจากสารแขวนลอยทั้งในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงต่ำที่สุด ถัดขึ้นไปคือร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก และสูงที่สุดที่ร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ หรือมีค่าผกผันกับปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากมีตัวรับอิเล็กตรอนมากขึ้นและอาจทำให้มีความต่อเนื่องของอนุภาคมากขึ้นด้วย จึงช่วยให้เกิดการแยกประจุเพิ่มมากขึ้น การรวมตัวของประจุลดลงซึ่งแสดงจากการคายแสงที่ลดลง [3], [81], [99]

#### 4.6 สมบัติทางกายภาพและแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์

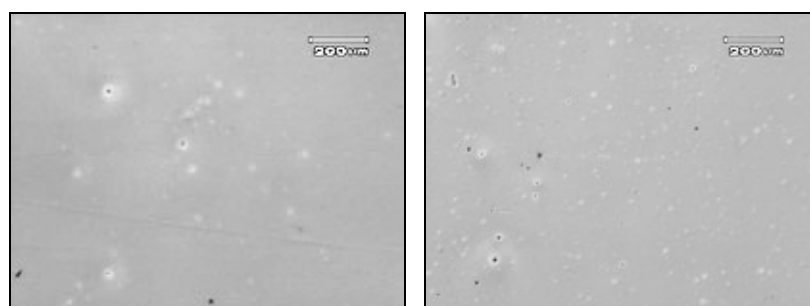
ต่อมาได้ทำการศึกษาโดยเปลี่ยนชนิดของคอนจูเกตพอลิเมอร์จากเอ็มอีเอช-พีพีวีเป็นพี3เอชที่ชนิดที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในสายโซ่พอลิเมอร์เป็นระเบียบสูง (regioregular) คือมีลักษณะของการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในสายโซ่พอลิเมอร์แบบหัวต่อหาง (head to tail) มากกว่าร้อยละ 98 ดังรูปที่ 4.45 ซึ่งส่งผลให้เกิด self-assembly ของคอนจูเกตพอลิเมอร์ได้เอง



รูปที่ 4.45 คอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชที่ชนิดที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในสายโซ่พอลิเมอร์เป็นระเบียบสูง (regioregular) <sup>[100]</sup>

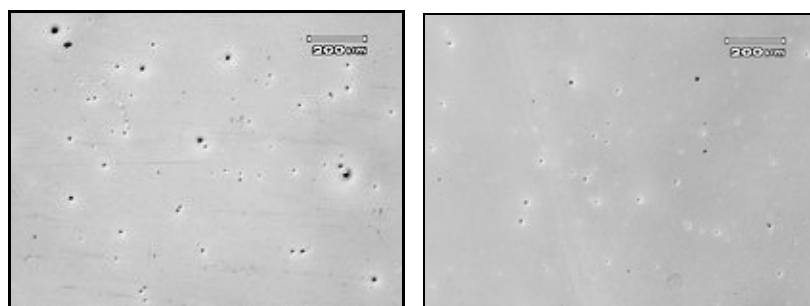
#### 4.6.1 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์

ผลการศึกษาโครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชที และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรอง เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของคอนจูเกตพอลิเมอร์เท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ขึ้นรูปโดยวิธีการสปินแคสติงที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที พบว่า ฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีที่เตรียมได้จะมีการกระจายตัวของกลุ่มพอลิเมอร์และหลุมเป็นบางจุด และมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ (รูปที่ 4.46 (ก)) ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนจะมีการกระจายตัวของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ทั่วพื้นผิวของฟิล์มและจะเห็นอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ที่ชัดเจนกว่าฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชที (รูปที่ 4.46 (ข)) อย่างไรก็ตามการศึกษาโครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคด้วยเทคนิคนี้ยังไม่แสดงความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ทั้งที่มีการเปลี่ยนชนิดและสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ ดังรูปที่ 4.46



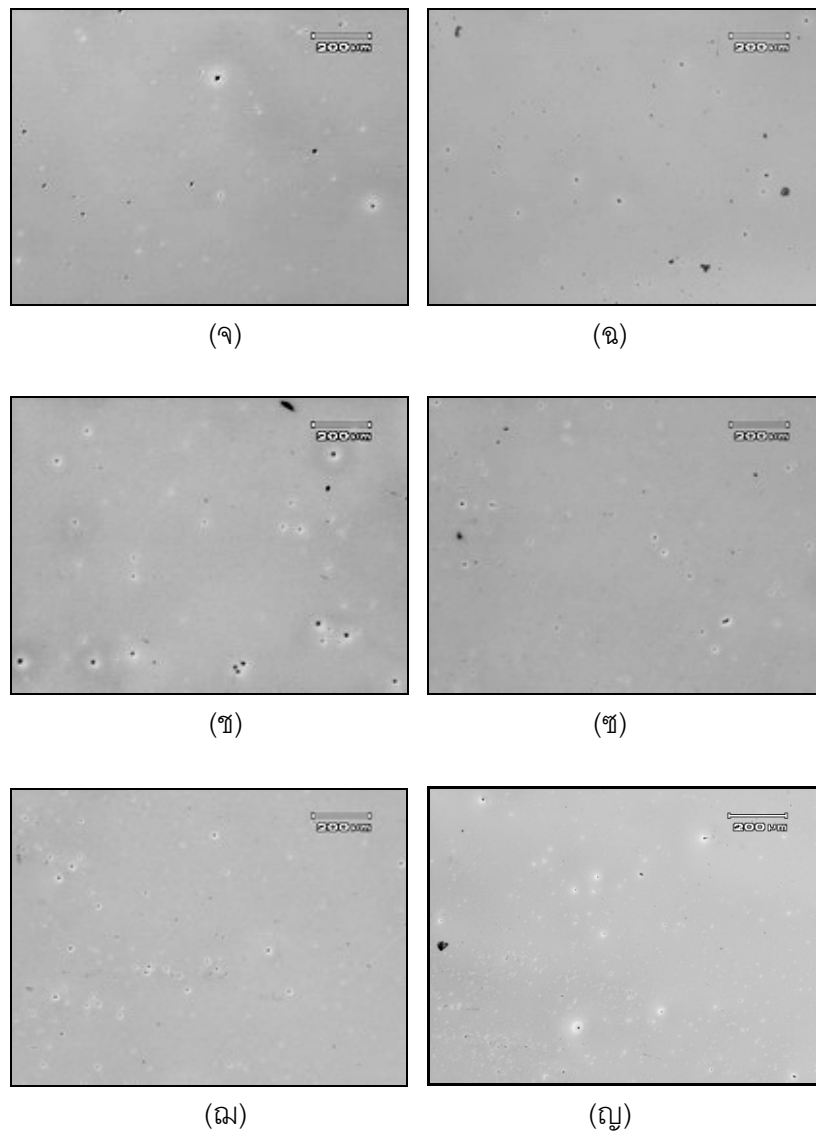
(ก)

(ข)



(ค)

(ง)

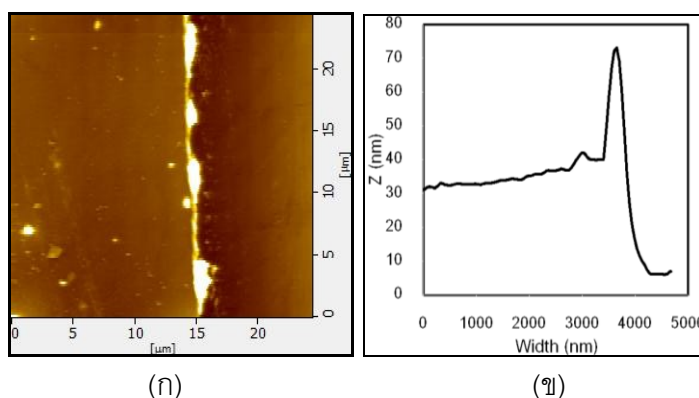


รูปที่ 4.46 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของ (ก) फिल्मบางคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชที फिल्मวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจาก (ข) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนผสมเมทานอล (ค) ร้อยละ 10 และ (ง) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผสมเอทานอล (จ) ร้อยละ 10 และ (ฉ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผสม 1-โพรพานอล (ช) ร้อยละ 10 และ (ซ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และผสม 1-บิวทานอล (ฅ) ร้อยละ 10 และ (ฌ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

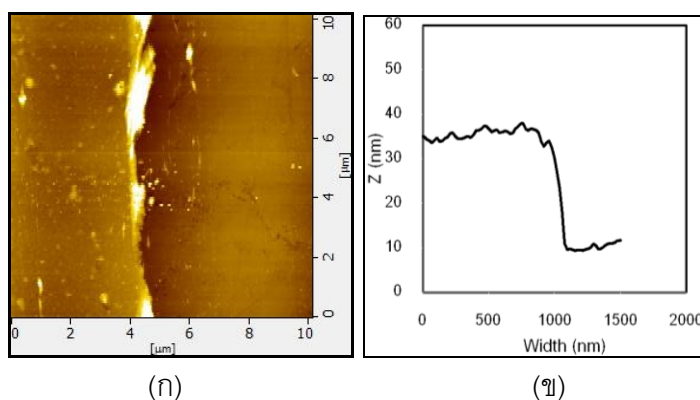
#### 4.6.2 สันฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์

##### 4.6.2.1 การหาความหนาของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

ค่าความหนาโดยเฉลี่ยของฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีที่วัดได้จะมีค่าต่ำกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที โดยที่ฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีนั้นจะมีค่าความหนาโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $36.178 \pm 16.062$  นาโนเมตร ค่าความหนาสูงสุดเท่ากับ 65.160 นาโนเมตร และค่าความหนาดำสุดเท่ากับ 20.250 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.47 ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีนั้นจะมีค่าความหนาโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $49.095 \pm 19.162$  นาโนเมตร ค่าความหนาสูงสุดเท่ากับ 104.210 นาโนเมตร และค่าความหนาดำสุดเท่ากับ 28.660 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.48 และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์มที่เตรียมจากคอนจูเกตพอลิเมอร์ชนิดเอ็มอีเอช-พีพีวีและพี3เอชทีพบว่า ความหนาของฟิล์มที่เตรียมได้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน แสดงว่าคอนจูเกตพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมีความหนืดที่ใกล้เคียงกันในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน



รูปที่ 4.47 (ก) สันฐานวิทยาบริเวณรอยขีดและ (ข) Depth profile ของรอยขีดแสดงความหนาของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน



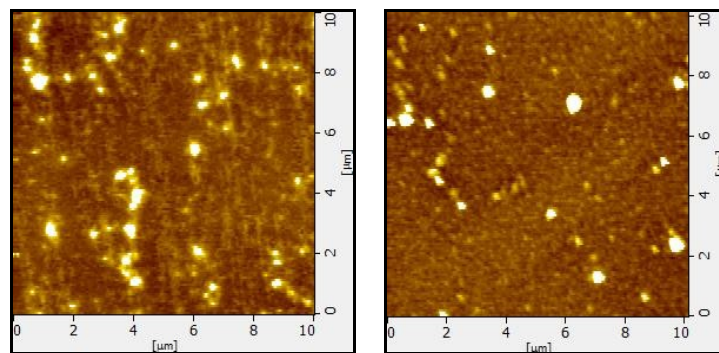
รูปที่ 4.48 (ก) สัณฐานวิทยาบริเวณรอยขีดและ (ข) Depth profile ของรอยขีดแสดงความหนาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน

#### 4.6.2.2 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมของฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรอง เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก และขึ้นรูปโดยวิธีการหมุนสปินแคสตั้งที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที พบว่า จะพบกลุ่มของพอลิเมอร์กระจายอยู่ทั่วๆ พื้นผิวของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชที ซึ่งในบางจุดจะมีการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ และมีลักษณะพื้นผิวของฟิล์มไม่ค่อยเรียบนัก ดังรูปที่ 4.49 (ก) ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน จะมีการกระจายตัวของกลุ่มอนุภาคและกลุ่มของพอลิเมอร์ขนาดเล็กๆ ทั่วพื้นผิวของฟิล์ม ดังรูปที่ 4.49 (ข) โดยมีความกว้างโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $132.35 \pm 28.89$  นาโนเมตร (ตารางที่ 4.9) และมีการเกาะตัวกันของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์อยู่เล็กน้อย และเมื่อมีการเติมแอลกอฮอล์ลงในสารแขวนลอยพบว่า ในฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิดที่มีความยาวของหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้นคือเมทานอลและเอทานอลที่สัดส่วนโดยปริมาตรเท่ากับร้อยละ 10 จะมีลักษณะการกระจายตัวและขนาดของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ใกล้เคียงกับฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน จากนั้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลและเอทานอลเป็นร้อยละ 20 พบว่า จะเกิดกระบวนการ

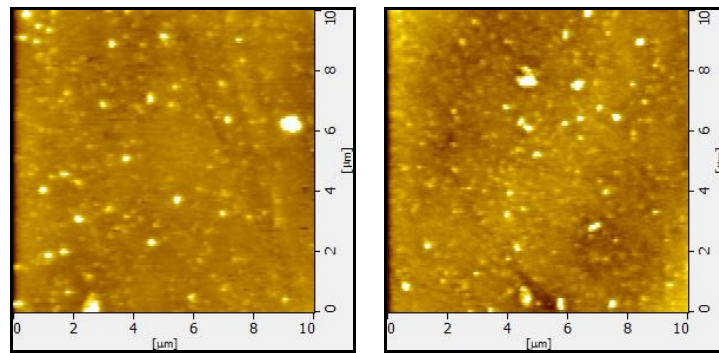


จัดเรียงตัวเข้าด้วยกันอย่างเป็นระเบียบด้วยตนเองของสายโซ่พอลิเมอร์ภายในโมเลกุลของพี3เอชทีหรือที่เรียกว่า self-assembly ซึ่งทำให้เห็นกลุ่มของอนุภาคและพอลิเมอร์ที่มีลักษณะรูปร่างเป็นแท่งขนาดเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของฟิล์ม ดังรูปที่ 4.49 (ค) – (ฉ) ต่อมาเมื่อเปลี่ยนชนิดของแอลกอฮอล์ให้มีความยาวของหมู่ไฮโดรคาร์บอนมากขึ้นเป็น 1-โพรพานอลและ 1-บิวทานอลพบว่า จะเกิดกระบวนการ self-assembly ของพี3เอชทีเป็นแท่งสั้นๆ ตั้งแต่ที่สัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 10 โดยที่จะไม่พบความแตกต่างกันมากนักเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ให้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 20 ดังรูปที่ 4.49 (ช) – (ญ)



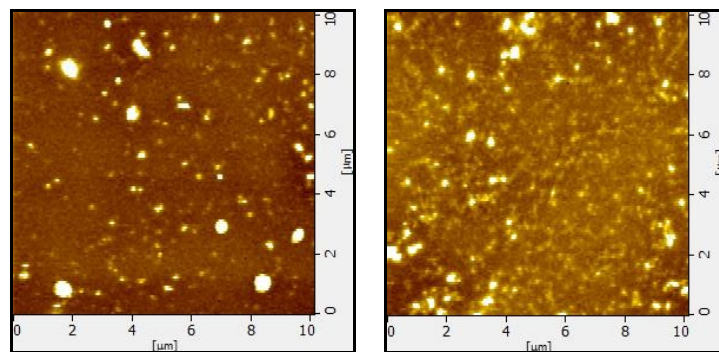
(ก)

(ข)



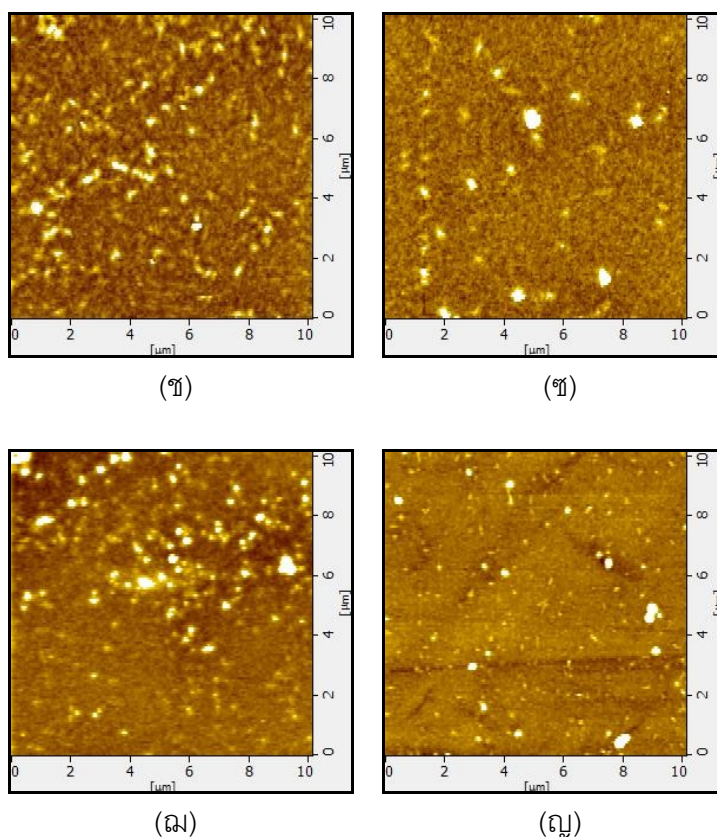
(ค)

(ง)



(ฉ)

(ช)



รูปที่ 4.49 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ (ก) พิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชที่ พิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่ที่เตรียมจาก (ข) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนผสมเมทานอล (ค) ร้อยละ 10 และ (ง) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผสมเอทานอล (จ) ร้อยละ 10 และ (ฉ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผสม 1-โพรพานอล (ช) ร้อยละ 10 และ (ซ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และผสม 1-บิวทานอล (ณ) ร้อยละ 10 และ (ญ) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

การใช้ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ในการเตรียมฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่พบว่า พิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้นจะมีการกระจายตัวของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ใกล้เคียงกับฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ให้สูงขึ้นจะส่งผลให้พี3เอชที่เกิด self-assembly เป็นแท่งขนาดเล็กๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบของแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาวซึ่งจะเห็นการเกิด self-assembly ของพี3เอชที่ได้อย่างชัดเจนตั้งแต่ที่สัดส่วนของแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตร ทั้งนี้

เนื่องจากการเติมแอลกอฮอล์ทำให้ความสามารถในการละลายของพี3เอชทีในตัวทำละลายหลักลดลงจึงส่งผลให้เกิดกระบวนการ self-assembly ของพี3เอชที

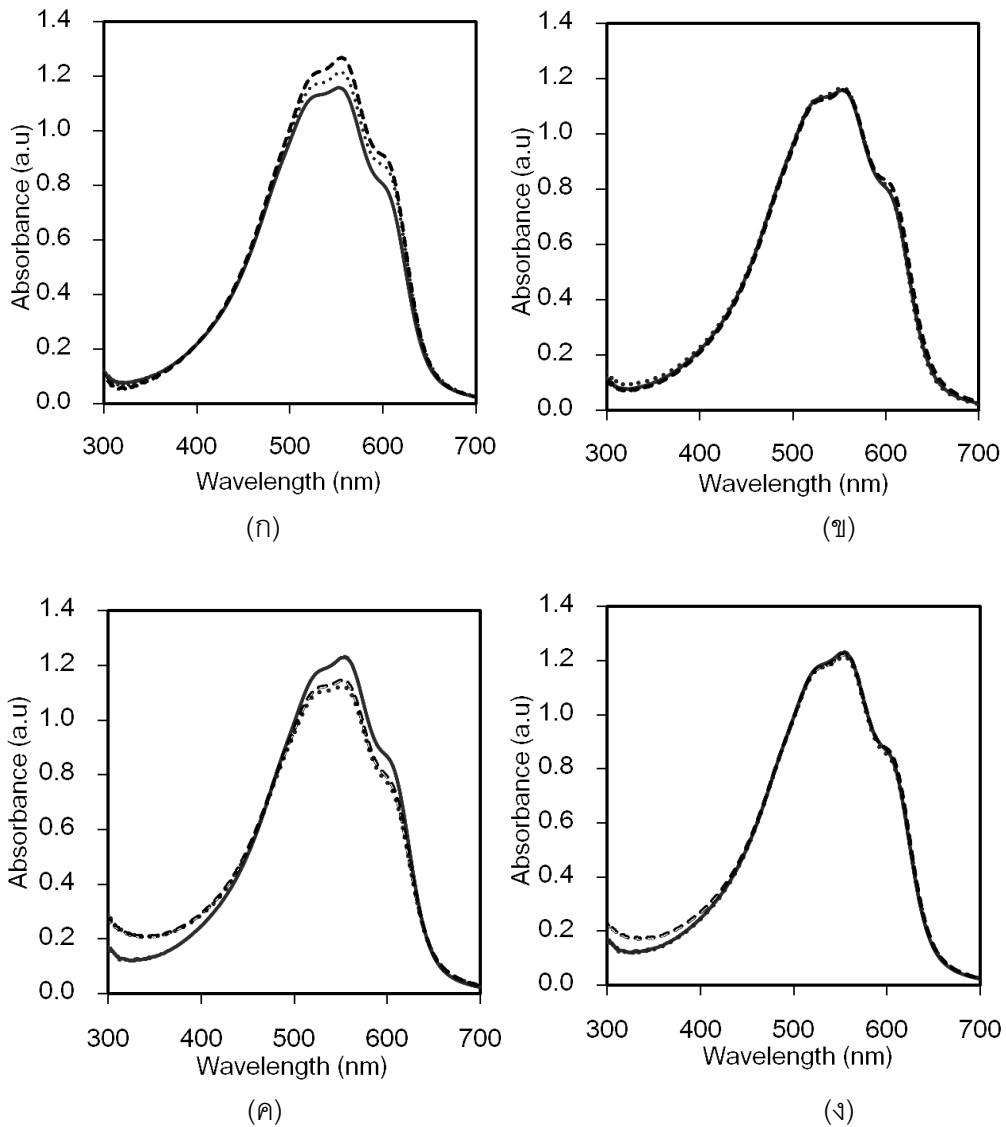
ตารางที่ 4.9 ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์ พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

ตัวทำละลาย	สัดส่วนของ แอลกอฮอล์ (%v/v)	ความกว้าง ของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูง ของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
คลอโรเบนซีน	0	132.35±28.89	3.56±1.34	2.78±0.76
คลอโรเบนซีน/ เมทานอล	10	141.12±11.37	2.90±1.34	4.44±0.39
	20	141.56±17.15	2.80±0.96	3.61±0.27
คลอโรเบนซีน/ เอทานอล	10	133.96±27.68	5.63±2.25	6.34±1.17
	20	132.57±23.53	6.37±1.99	6.11±0.36
คลอโรเบนซีน/ 1-โพรพานอล	10	153.37±38.63	12.45±5.78	4.14±0.23
	20	157.78±36.63	6.58±4.27	2.48±1.88
คลอโรเบนซีน/ 1-บิวทานอล	10	157.67±29.55	8.94±3.26	3.24±0.90
	20	142.27±36.54	6.90±3.73	2.37±0.99

#### 4.6.3 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์

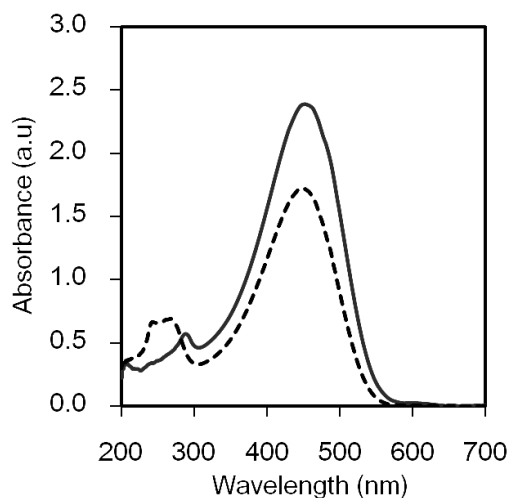
จากการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีพบว่า กราฟสเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบทั้งหมดจะมีลักษณะเหมือนกันคือ สเปกตรากการดูดกลืนแสงจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นของรังสีวิสิเบิลหรือแสงที่สามารถมองเห็นได้ โดยมีพีคของการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 และ 560 นาโนเมตร และมีไหล่ที่แถบความยาวคลื่น 605 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.50 และเมื่อพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงพบว่า

การดูดกลืนแสงของฟิล์มทั้งหมดจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยปริมาณของแอลกอฮอล์ที่ใช้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบเพียงเล็กน้อย

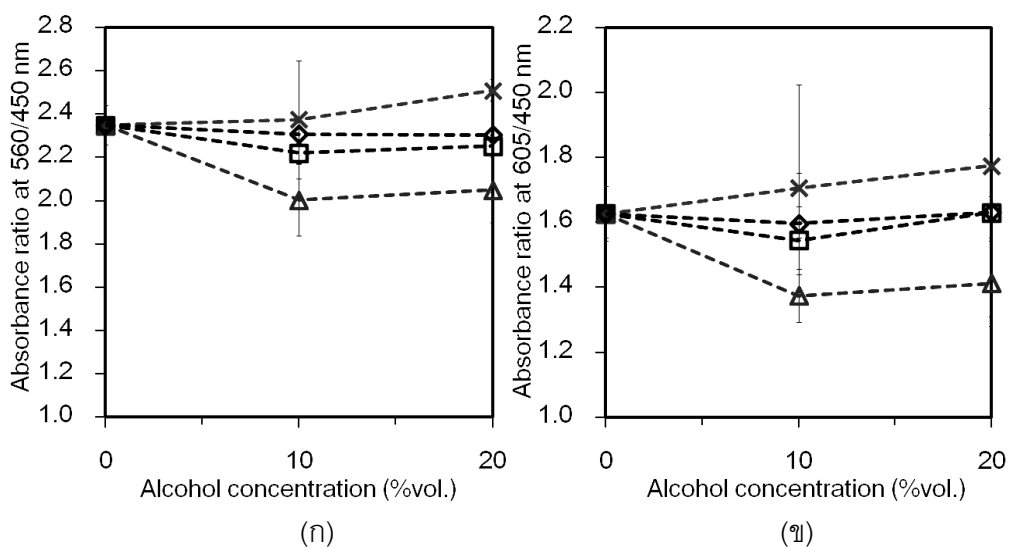


รูปที่ 4.50 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (ก) เมทานอล (ข) เอทานอล (ค) 1-โพรพานอล และ (ง) 1-บิวทานอล ร้อยละ 10 (•••) และ 20 (- -) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

การวิเคราะห์หาปริมาณการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ภายในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนระหว่างค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (aggregation) ต่อค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่นที่สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (agglomeration) โดยที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีจะมีตำแหน่งความยาวคลื่นที่สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบคือ ที่แถบความยาวคลื่น 520 และ 560 นาโนเมตรซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดอันตรกิริยาของ  $\pi-\pi^*$  ภายในสายโซ่พอลิเมอร์เดียวกัน และที่แถบความยาวคลื่น 605 นาโนเมตรซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดอันตรกิริยาของ  $\pi-\pi^*$  ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์<sup>[101], [102]</sup> สำหรับตำแหน่งความยาวคลื่นที่สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบสามารถหาได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนหรือตัวทำละลายคลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้นของคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชทีเท่ากับ 0.002 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรเพื่อดูการดูดกลืนแสงของสายโซ่พอลิเมอร์โมเลกุลเดี่ยว<sup>[103]</sup> ซึ่งในงานวิจัยนี้วัดได้ที่ความยาวคลื่นประมาณ 450 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.51 ดังนั้นการคำนวณหาปริมาณการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ภายในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบจะคำนวณที่สัดส่วนการดูดกลืนแสงด้วยกัน 2 สัดส่วนคือ สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560/450 นาโนเมตรและ 605/450 นาโนเมตร ซึ่งจากการทดลองพบว่า ค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงทั้ง 2 สัดส่วนมีลักษณะแนวโน้มเหมือนกัน คือฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้นจะมีค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์สูงขึ้น ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาวจะมีค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงลดลง ดังรูปที่ 4.52

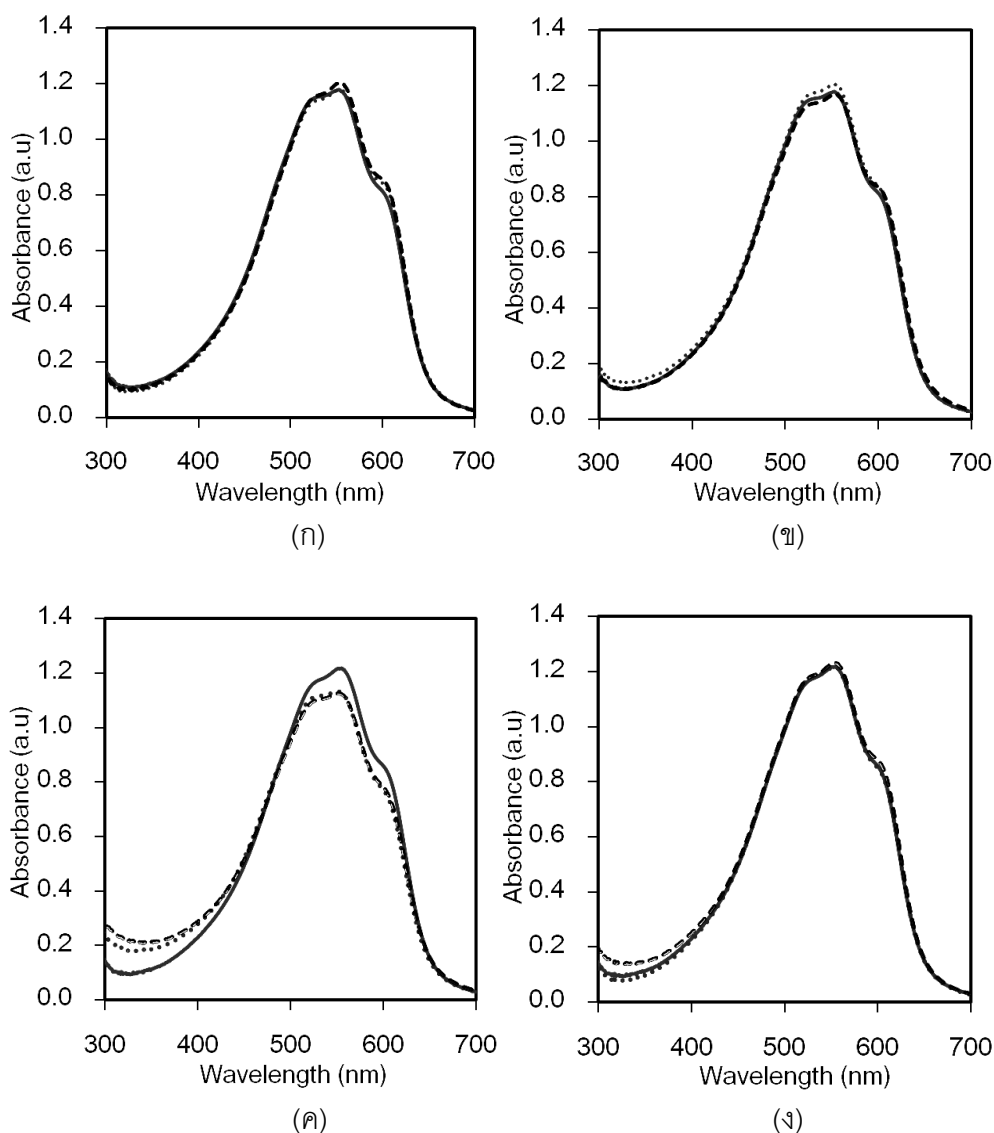


รูปที่ 4.51 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของคอนจูเกตพอลิเมอร์พี3เอชที่ชนิดโมเลกุลเดี่ยวในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม (---)



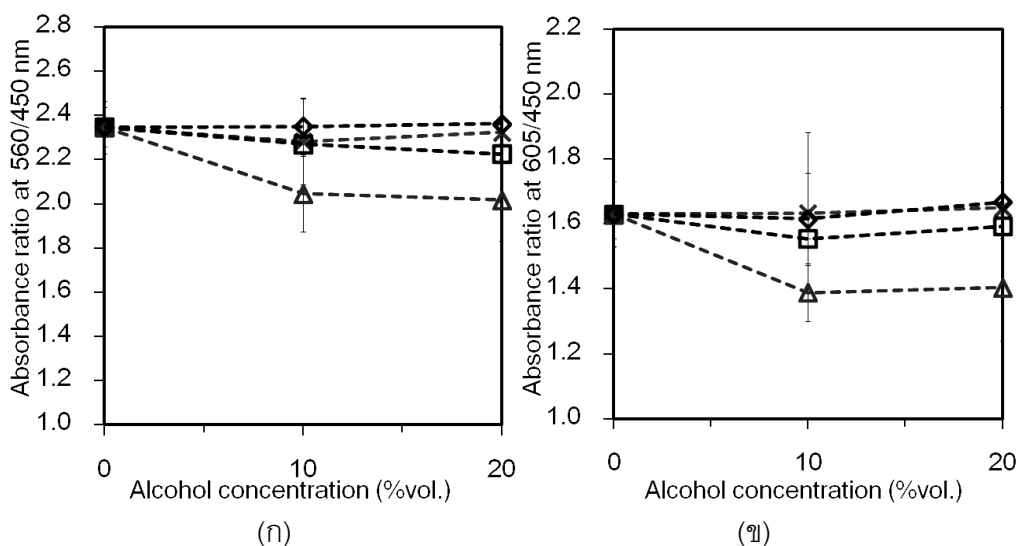
รูปที่ 4.52 สัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่ที่ความยาวคลื่น (ก) 560/450 นาโนเมตร และ (ข) 605/450 นาโนเมตร ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (x) เมทานอล (□) เอทานอล (▲) 1-โพรพานอล และ (◇) 1-บิวทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

เมื่อนำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่มาอบในเตาสัญญากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า กราฟสเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบทั้งหมดจะมีความสูงใกล้เคียงกัน มีเพียงฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/1-โพรพานอลเท่านั้นที่มีค่าการดูดกลืนแสงแตกต่างกันเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (ก) เมทานอล (ข) เอทานอล (ค) 1-โพรพานอล และ (ง) 1-บิวทานอล ร้อยละ 10 (•••) และ 20 (- - -) โดยปริมาตร ที่ปริมาตรของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ

เมื่อคำนวณค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560/450 นาโนเมตรและ 605/450 นาโนเมตร หลังอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับก่อนอบ คือในฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้นจะมีค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ให้สูงขึ้น ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาวจะมีค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงลดลง ดังรูปที่ 4.54 อย่างไรก็ตามค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงทั้งก่อนอบและหลังอบนั้นค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนั้นการอบจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก

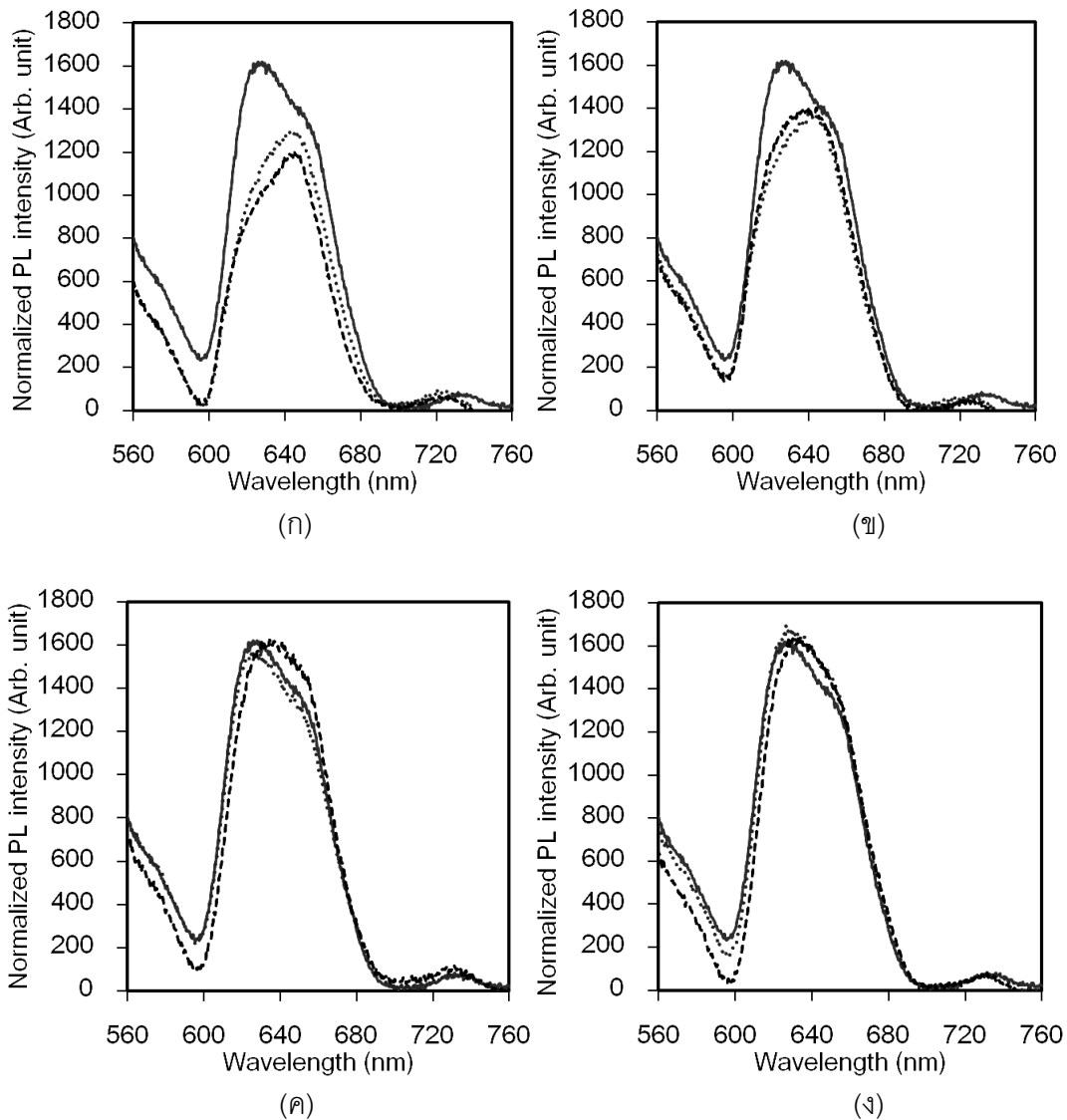


รูปที่ 4.54 สัดส่วนการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่ที่ความยาวคลื่น (ก) 560/450 นาโนเมตร และ (ข) 605/450 นาโนเมตร ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (×) เมทานอล (⊖) เอทานอล (△) 1-โพรพานอล และ (◆) 1-บิวทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ

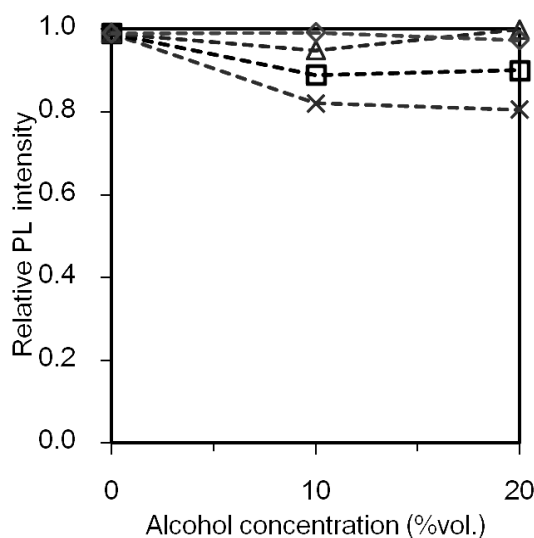


#### 4.6.4 สมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์

จากการศึกษาสมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปีพบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหมุนสปินเคลสตั้งจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้น จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้จากการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรต่ำกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ดังรูปที่ 4.55 โดยที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เอทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนประมาณร้อยละ 15 และ 10 ตามลำดับ และจะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงค่อนข้างคงที่เมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์สูงขึ้นเป็นร้อยละ 20 ดังรูปที่ 4.56 ในขณะที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาวจะมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและค่อนข้างคงที่ในทุกสัดส่วน ซึ่งค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่ลดลงได้น้อยเกิดจากการเกิด self-assembly ของพี3เอชทีซึ่งทำให้เกิดการแยกเฟส รวมทั้งการตกค้างของแอลกอฮอล์ภายในฟิล์มที่ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของประจุไปยังขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับผลของคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีในหัวข้อที่ 4.4.4 จึงส่งผลให้เกิดการแยกประจุได้น้อย

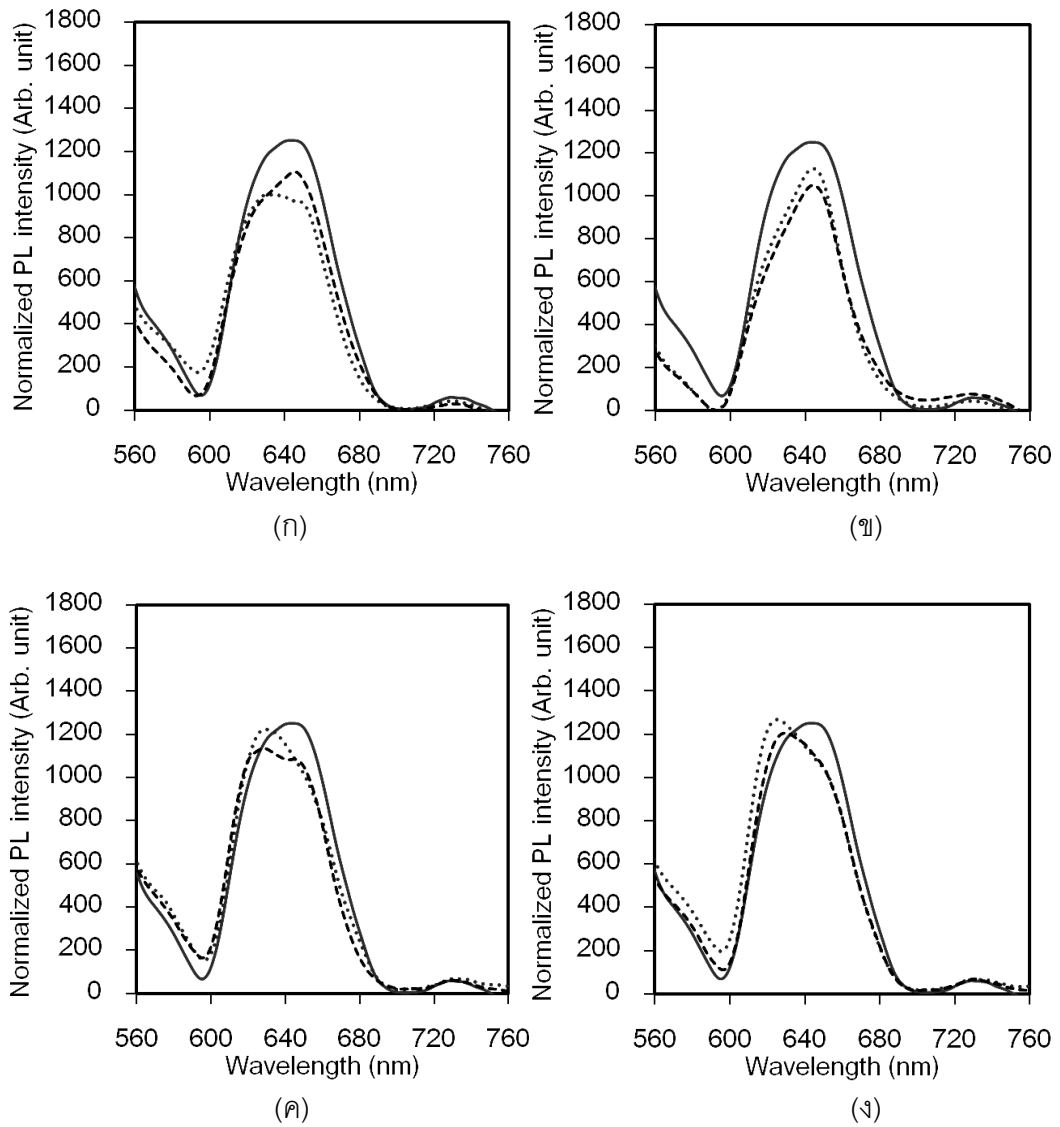


รูปที่ 4.55 สเปกตรากการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (ก) เมทานอล (ข) เอทานอล (ค) 1-โพรพานอล และ (ง) 1-บิวทานอล ร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

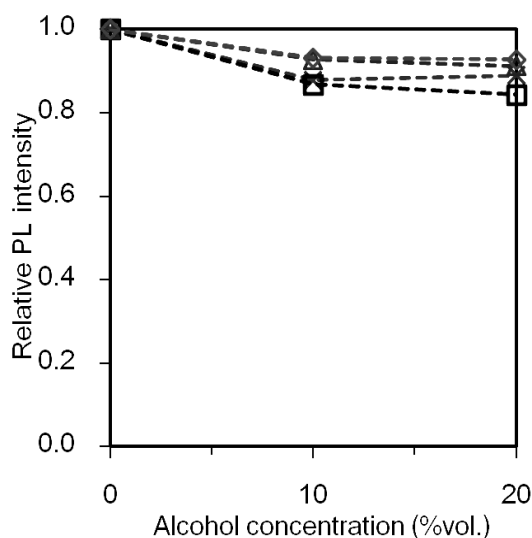


รูปที่ 4.56 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (×) เมทานอล (⊕) เอทานอล (▲) 1-โพรพานอล และ (◆) 1-บิวทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก

หลังจากนั้นนำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที ไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงพบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบหลังอบมีค่าลดลงจากก่อนอบและมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.57 โดยฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้นๆจะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลงจากฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนมากกว่าฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาว ดังรูปที่ 4.58 ซึ่งค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่ลดลงได้น้อยของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาว เกิดจากการเกิด self-assembly เป็นแท่งขนาดเล็กของพอลิเมอร์ซึ่งทำให้เกิดการแยกเฟสกันระหว่างเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์และพี3เอชที ส่งผลให้เกิดการแยกประจุน้อย



รูปที่ 4.57 สเปกตราการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (ก) เมทานอล (ข) เอทานอล (ค) 1-โพรพานอล และ (ง) 1-บิวทานอล ร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ

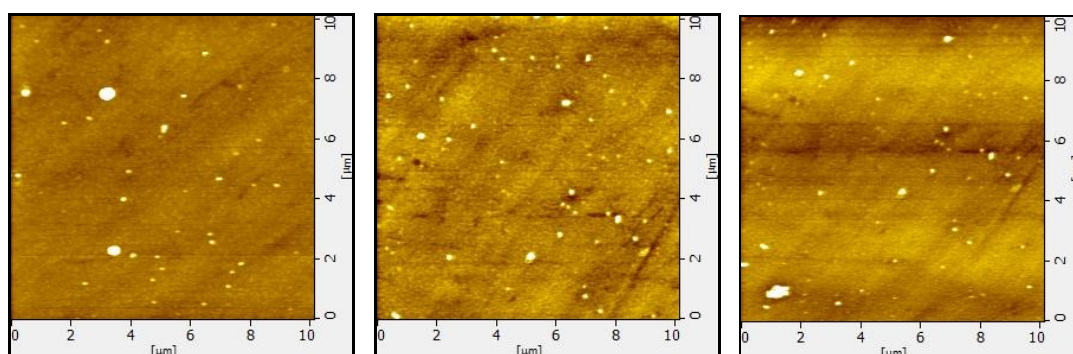


รูปที่ 4.58 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ชนิด (×) เมทานอล (⊕) เอทานอล (▲) 1-โพรพานอล และ (◇) 1-บิวทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก หลังอบ

จากผลการศึกษามิติทางกายภาพและทางแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรอง เท่ากับร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก พบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบทั้งหมดที่เตรียมได้ไม่มีรอยแตกหรือหลุม โดยการเติมแอลกอฮอล์จะส่งผลให้เกิด self-assembly ของพี3เอชที ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการละลายของพี3เอชที ในตัวทำละลายหลักลดลงซึ่งเห็นได้ชัดในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาว ทำให้เกิดการแยกเฟสกันระหว่างเฟสของไทเทเนียมไดออกไซด์กับเฟสของพี3เอชที ส่งผลให้ไม่เกิดการลดลงของค่าความเข้มแสงของการคายแสงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน

#### 4.6.5 สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ

สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรอง เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยปริมาตร จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ มีความขรุขระต่ำ และพบการกระจายตัวของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ทั่วพื้นผิวของฟิล์ม โดยเมื่อเติมเมทานอลลงไปที่สัดส่วนร้อยละ 10 และร้อยละ 20 โดยปริมาตร พบว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มและการกระจายตัวของอนุภาคบนฟิล์มไม่แตกต่างจากฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนมากนัก ดังรูปที่ 4.59 โดยขนาดความกว้างของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง  $120.02 \pm 28.08$  ถึง  $148.00 \pm 29.49$  นาโนเมตร ความสูงของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์อยู่ในช่วง  $4.58 \pm 1.52$  ถึง  $7.83 \pm 2.43$  นาโนเมตร และความขรุขระของฟิล์ม  $1.29 \pm 0.20$  ถึง  $1.93 \pm 0.13$  นาโนเมตร ดังตารางที่ 4.10



(ก)

(ข)

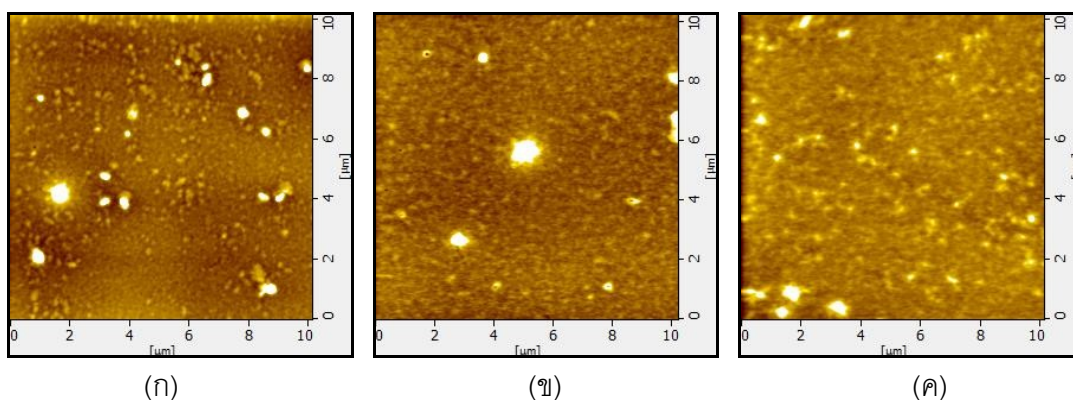
(ค)

รูปที่ 4.59 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจาก (ก) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (ข) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.10 ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก

ตัวทำละลาย	สัดส่วนของแอลกอฮอล์ (%v/v)	ความกว้างของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูงของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
คลอโรเบนซีน	0	120.02±28.08	7.83±2.43	1.93±0.13
คลอโรเบนซีน/ เมทานอล	10	126.39±23.20	7.72±3.10	1.29±0.20
	20	148.00±29.49	4.58±1.52	1.55±0.61

ในขณะที่สัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีในตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ที่มีปริมาณของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก พบว่า จะมีการกระจายตัวของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ค่อนข้างมากและพบการเกาะตัวกันของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์บนฟิล์มในบางจุด โดยรูปร่างของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ที่พบจะมีลักษณะเป็นแท่งรีขนาดเล็ก และเมื่อเติมเมทานอลลงไปในสารแขวนลอยที่สัดส่วนร้อยละ 10 โดยปริมาตร พบว่ารูปร่างของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์เป็นแท่งยาวขึ้นและมีการกระจายอยู่ทั่วฟิล์ม จากนั้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลเป็นร้อยละ 20 พบว่ารูปร่างของกลุ่มของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นแท่งขนาดเล็กและในบางส่วนจะเป็นเส้นสั้นๆ ซึ่งยังเห็นไม่ชัดเจนนัก ดังรูปที่ 4.60 โดยรูปร่างที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากกระบวนการ self-assembly ของพี3เอชทีเนื่องจากการเพิ่มสัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการละลายของพี3เอชทีในตัวทำละลายหลักลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการเติมแอลกอฮอล์ลงไปในส่วนที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้พี3เอชทีซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในสายโซ่พอลิเมอร์เป็นระเบียบสูงเกิดกระบวนการ self-assembly ปรากฏเป็นรูปร่างแบบแท่งหรือเส้นใย ซึ่งค่าขนาดความกว้างและความสูงของอนุภาคบนฟิล์มและความขรุขระของฟิล์มที่วัดได้นั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงกว่าค่าของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 9.04 และ 13.21 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.11



รูปที่ 4.60 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจาก (ก) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (ข) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 และ (ค) ร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.11 ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก

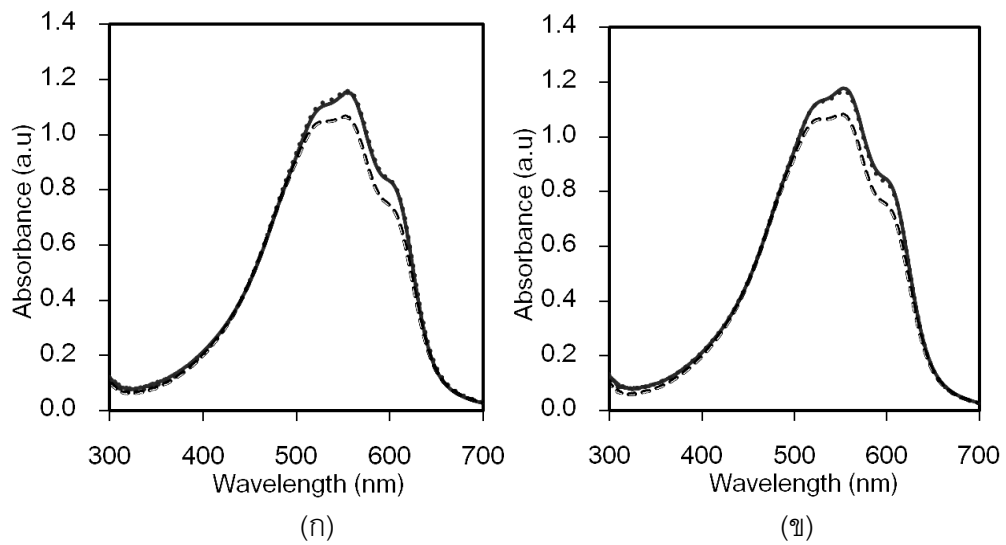
ตัวทำละลาย	สัดส่วนของแอลกอฮอล์ (%v/v)	ความกว้างของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูงของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
คลอโรเบนซีน	0	176.75±26.76	7.55±6.03	2.95±0.28
คลอโรเบนซีน/ เมทานอล	10	179.33±32.84	7.54±3.00	3.86±2.39
	20	186.69±40.17	9.89±2.63	3.32±0.33



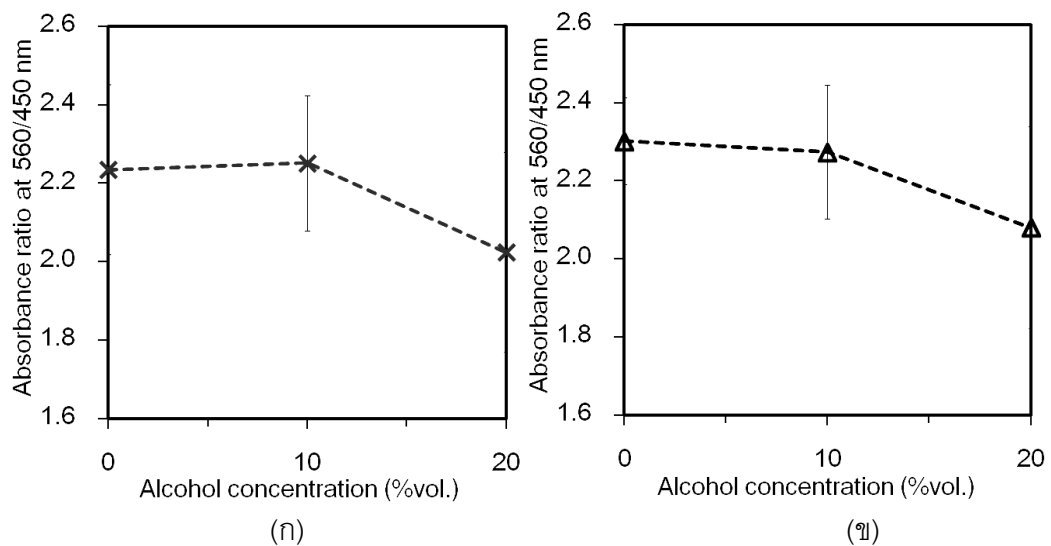
#### 4.6.6 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ

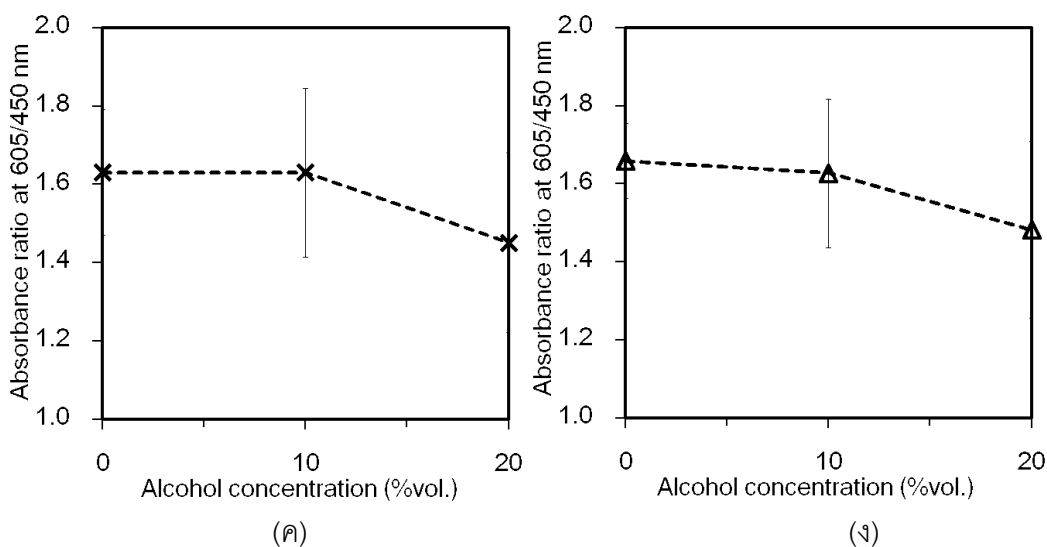
การศึกษาฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์หลังการกรองเท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีพบว่า สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ทั้งหมดมีลักษณะเหมือนกัน โดยฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตรจะมีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากัน ในขณะที่ฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตรจะมีค่าการดูดกลืนแสงลดลง ดังรูปที่ 4.61 (ก) และเมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณการจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์โดยการคำนวณสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560/450 และ 605/450 นาโนเมตร ระหว่างฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลพบว่า การเติมเมทานอลลงไปในส่วนผสมที่สัดส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตร มีผลต่อตำแหน่งยอดที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุดซึ่งทำให้สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้ง 2 สัดส่วนของฟิล์มมีค่าลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ในขณะที่สัดส่วนของเมทานอลเท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตรจะมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มที่เตรียมด้วยตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ดังรูปที่ 4.62 (ก) และ (ค) และเมื่อพิจารณาถึงผลหลังอบที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ภายในฟิล์มเกิดการผ่อนคลายและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่พบว่าค่าการดูดกลืนแสงและสัดส่วนการดูดกลืนแสงไม่แตกต่างไปจากตอนก่อนอบ ดังรูปที่ 4.61 (ข) และรูปที่ 4.62 (ข) และ (ง) และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้ง 2 สัดส่วนของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบก่อนอบและหลังอบพบว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยหลังอบจะมีค่าสัดส่วนสูงกว่าก่อนอบเล็กน้อย

ในขณะที่ผลการศึกษาการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกันกับที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.63 โดยมีค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้ง 2 สัดส่วนของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบก่อนอบและหลังอบใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.64

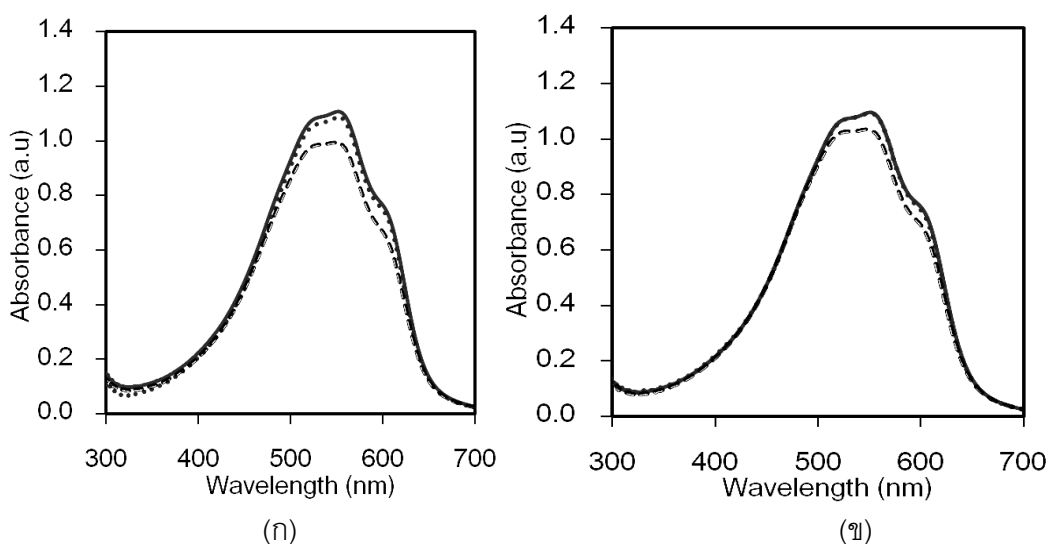


รูปที่ 4.61 สเปกตรากการดูดกลืนแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชซีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสม คลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียม ไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก

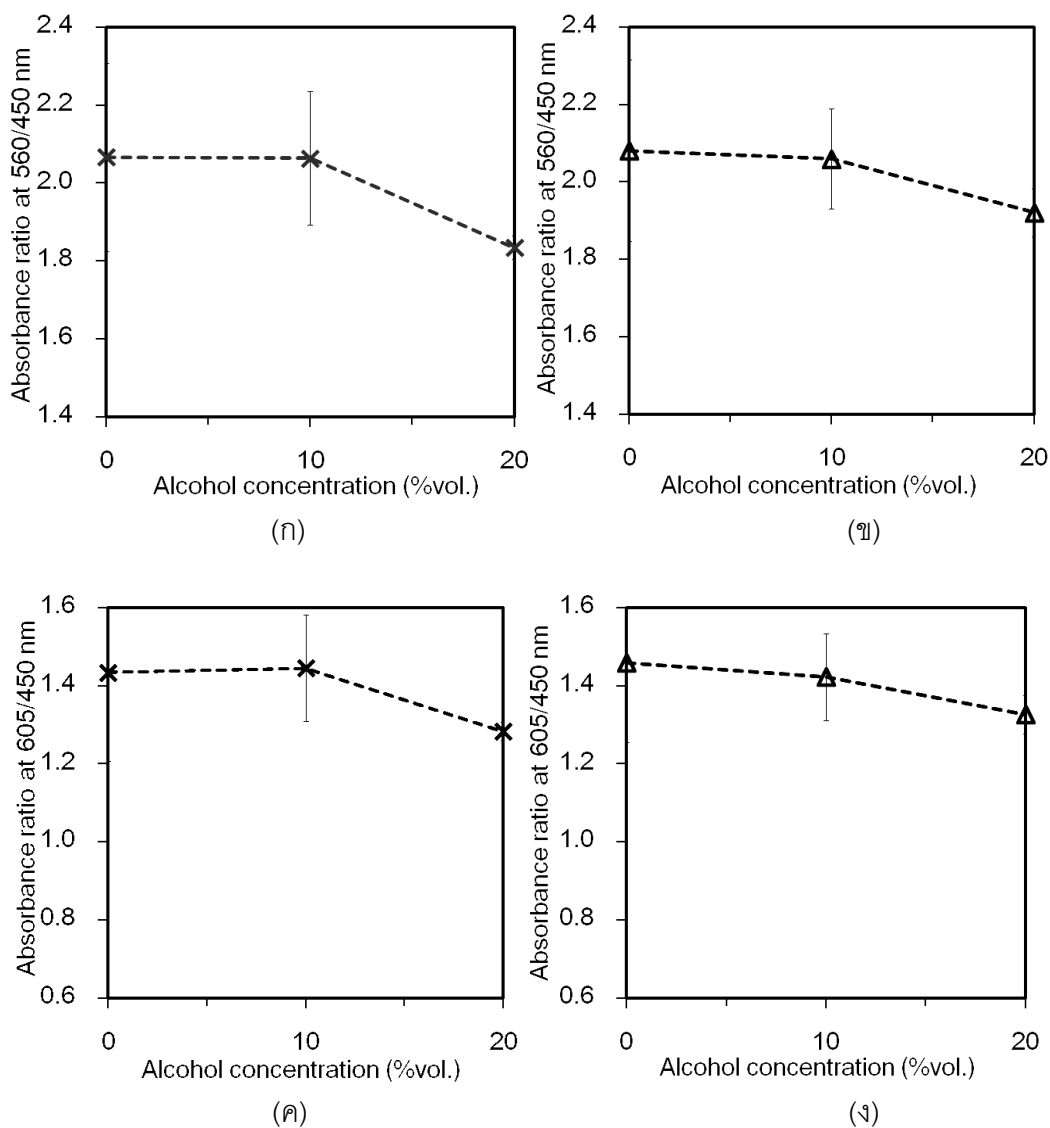




รูปที่ 4.62 สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560/450 นาโนเมตร (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ และสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 605/450 นาโนเมตร (ค) ก่อนอบ และ (ง) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก



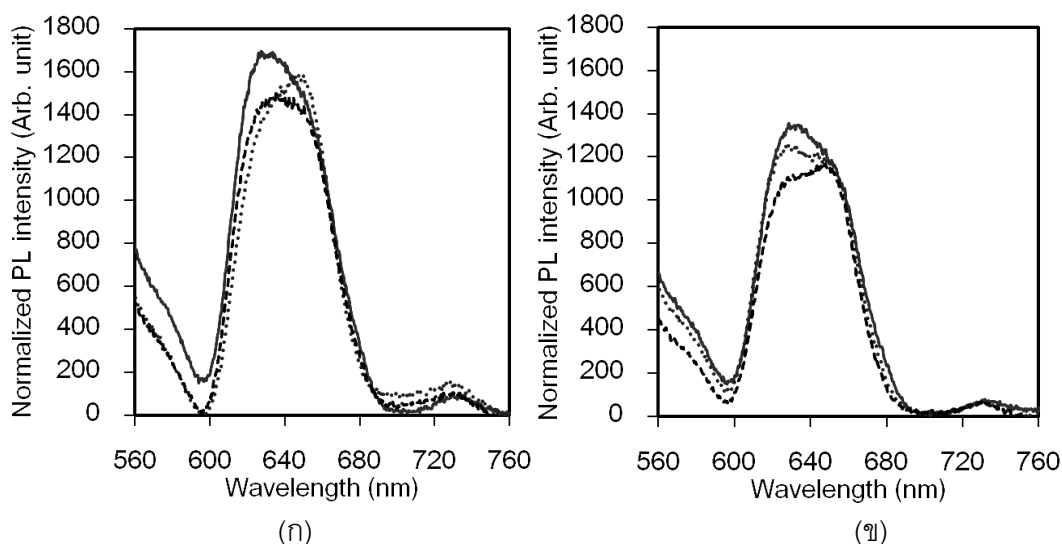
รูปที่ 4.63 สเปกตรากการดูดกลืนแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก



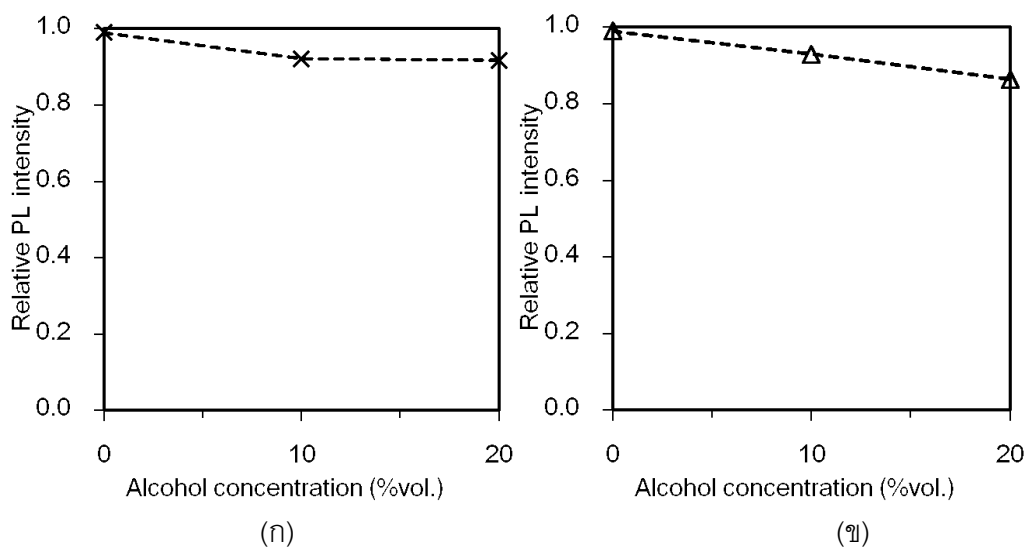
รูปที่ 4.64 สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 560/450 นาโนเมตร (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ และสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 605/450 นาโนเมตร (ค) ก่อนอบ และ (ง) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก

#### 4.6.7 สมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชซีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ

ค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปีโดยการกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชซี ที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.65 (ก) โดยที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลเท่ากับร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะมีค่าลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนประมาณร้อยละ 5 ดังรูปที่ 4.66 (ก) ซึ่งหลังจากนำไปบอบพบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบหลังอบจะมีค่าลดลงจากค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มก่อนอบ (รูปที่ 4.65 (ข)) และมีแนวโน้มเช่นเดียวกับก่อนอบ โดยที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลเท่ากับร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะมีค่าลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนประมาณร้อยละ 10 ดังรูปที่ 4.66 (ข)

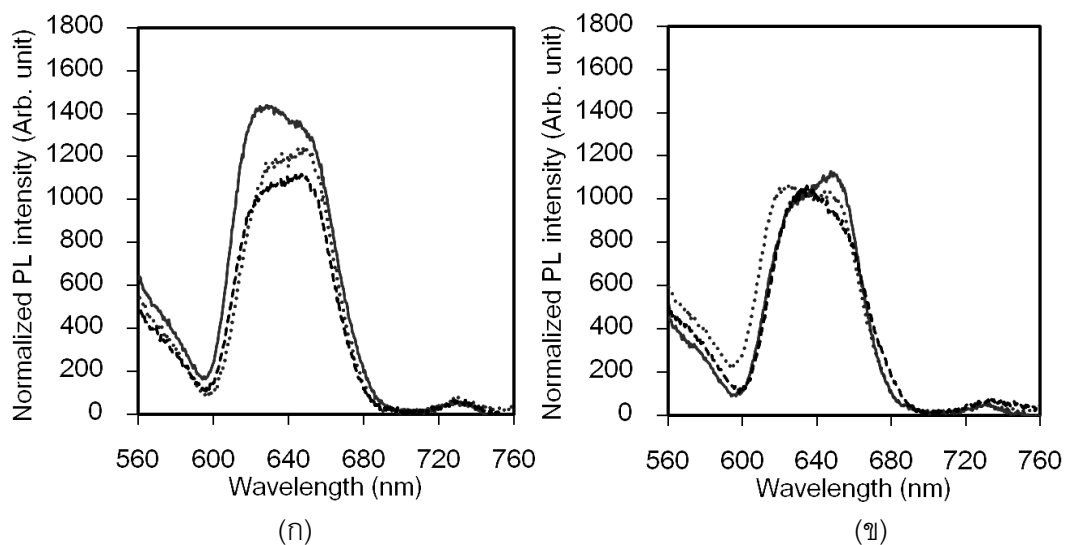


รูปที่ 4.65 สเปกตรากการคายแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชซีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 (•••) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก

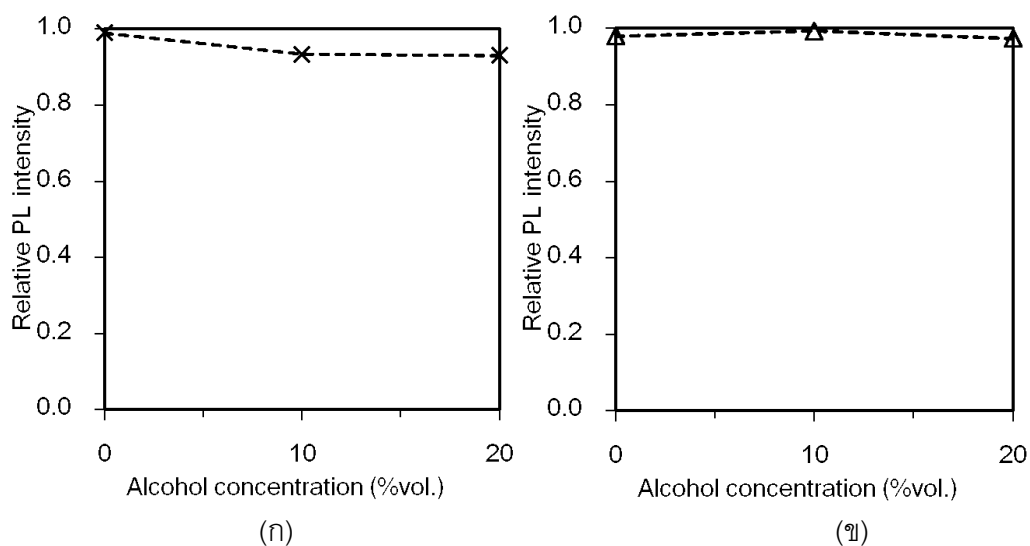


รูปที่ 4.66 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก

ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที ที่เตรียมจากปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนักพบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบก่อนอบจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.67 (ก) โดยที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลเท่ากับร้อยละ 20 โดยปริมาตร จะมีค่าลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนประมาณร้อยละ 5 ดังรูปที่ 4.68 (ก) ในขณะที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มหลังอบจะมีค่าลดลงจากฟิล์มก่อนอบและมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ ดังรูปที่ 4.67 (ข) และ 4.68 (ข)



รูปที่ 4.67 สเปกตรากการคายแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่เตรียมมาจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 (···) และ 20 (---) โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก

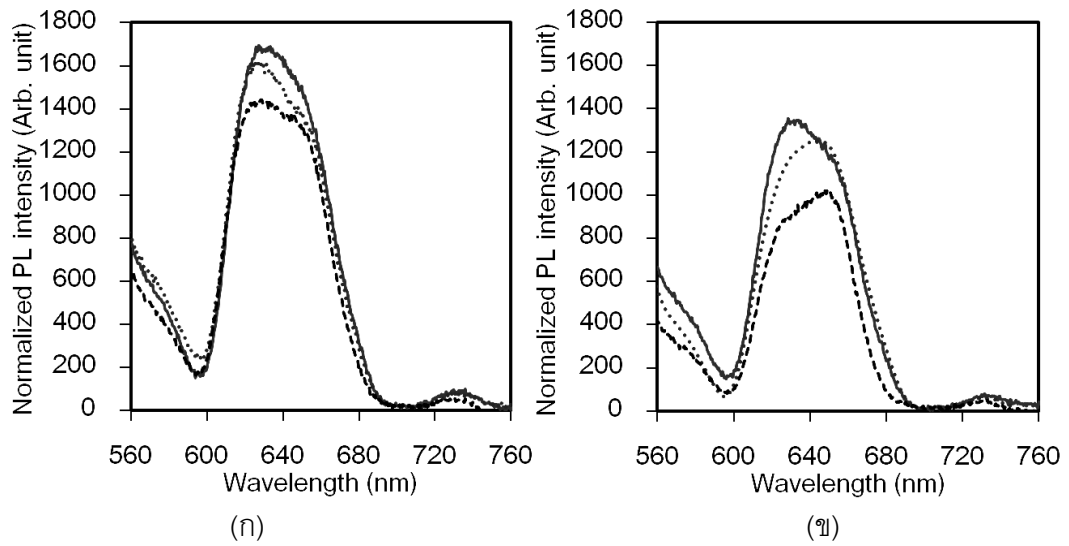


รูปที่ 4.68 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่เตรียมมาจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก

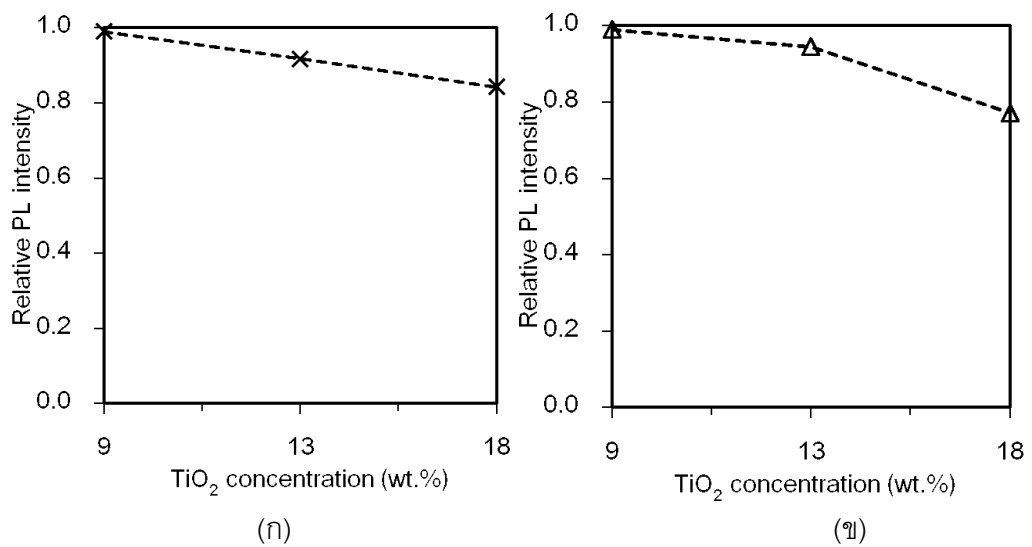
เมื่อพิจารณาผลของการใช้แอลกอฮอล์เป็นสารเติมแต่งในการช่วยกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจุกตพอลิเมอร์พี3เอชที่พบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้ง 3 สัดส่วนก่อนอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์สูงขึ้นและหลังอบมีแนวโน้มคงที่ อย่างไรก็ตามค่าที่ลดลงนั้นค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากคอนจุกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี ทั้งนี้เนื่องจากการเกิด self-assembly ของพี3เอชที่

ต่อมาได้ทำการศึกษาโดยเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยที่มีสัดส่วนความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ กัน โดยในระบบของคลอโรเบนซีนพบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อสัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของไทเทเนียมไดออกไซด์สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.69 (ก) โดยที่ปริมาณร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนักมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลงจากที่ปริมาณร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนักประมาณร้อยละ 15 ดังรูปที่ 4.70 (ก) ในขณะที่ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่หลังอบ จะมีค่าต่ำกว่าก่อนอบและมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.69 (ข) โดยที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงลดลงจากที่ปริมาณร้อยละ 9.04 โดยน้ำหนัก ประมาณร้อยละ 22 ดังรูปที่ 4.70 (ข) ซึ่งการเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ให้สูงขึ้น จะทำให้มีตัวรับอิเล็กตรอนมากขึ้นส่งผลให้เกิดการแยกประจุเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี



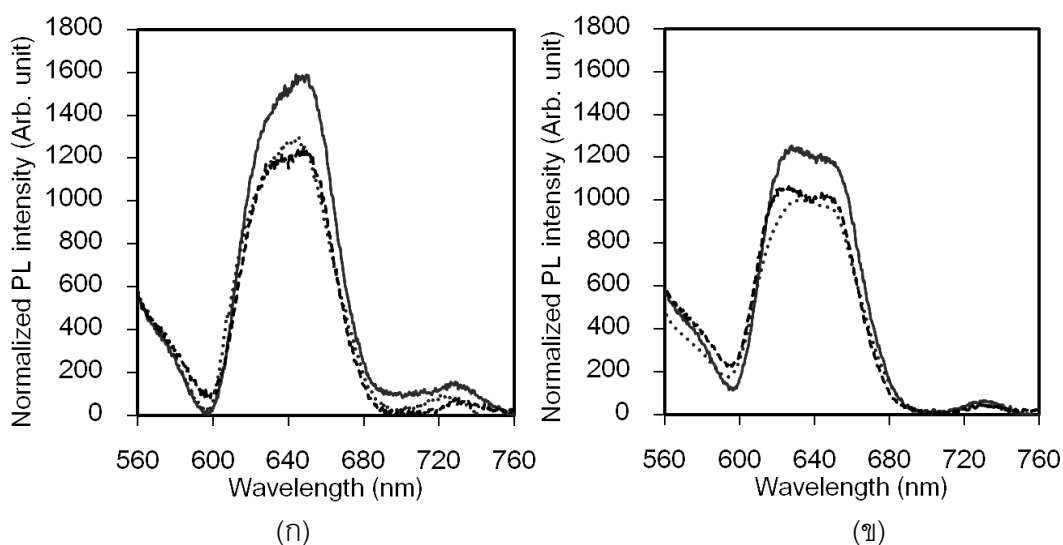


รูปที่ 4.69 สเปกตรากายแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชซีที่เตรียมมาจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 9.04 (—) 13.21 (···) และ 18.16 (---) โดยน้ำหนัก

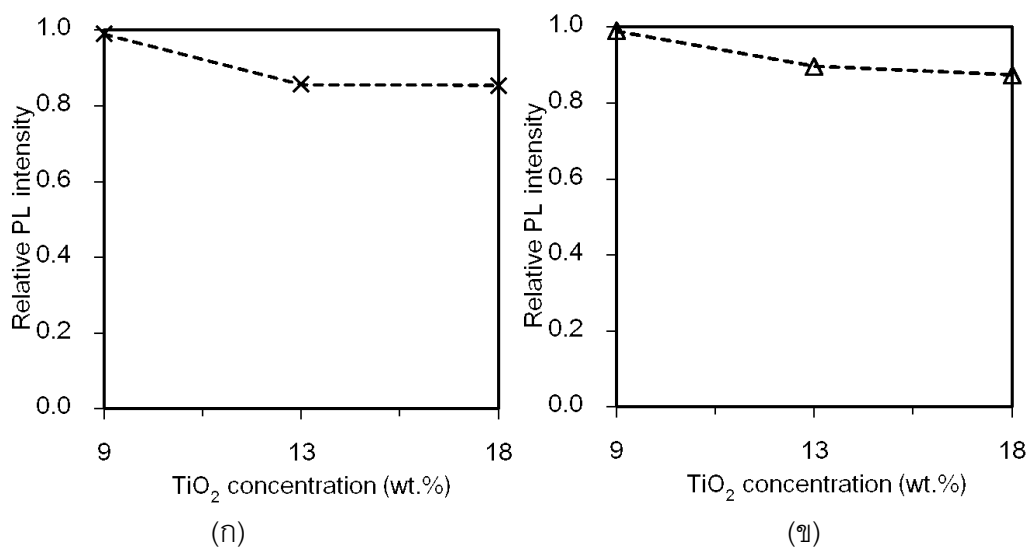


รูปที่ 4.70 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพัทธ์ (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชซีที่เตรียมมาจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ

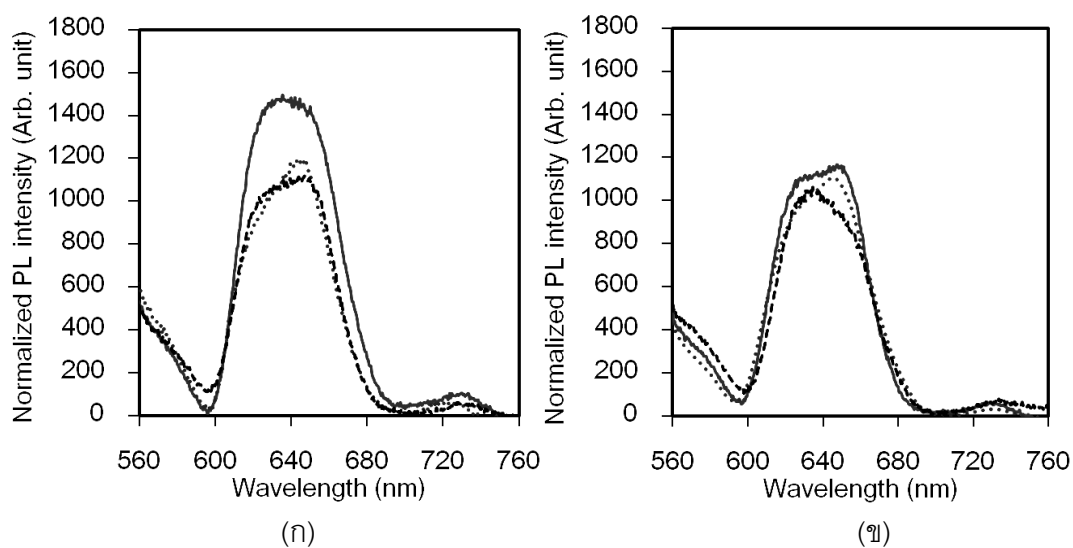
ในระบบของตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลพบว่า ที่สัดส่วนร้อยละโดยปริมาตรของเมทานอลทั้ง 2 สัดส่วนมีแนวโน้มคล้ายคลึงกันคือ ค่าความเข้มแสงของการคายแสงจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์จากร้อยละ 9.04 เป็นร้อยละ 13.21 โดยน้ำหนัก จากนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณเป็นร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ค่าความเข้มของการคายแสงจะค่อนข้างคงที่ ดังรูปที่ 4.71 – 4.74 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์จากร้อยละ 9.04 เป็น 13.21 โดยน้ำหนักจะช่วยให้เกิดการขนถ่ายประจุที่ดีขึ้นส่งผลให้มีการแยกประจุที่ดีขึ้นค่าความเข้มแสงของการคายแสงจึงลดลง ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณให้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ค่าความเข้มแสงของการคายแสงกลับคงที่เนื่องจากความสามารถในการละลายของพี3เอชทีในตัวทำละลายผสมลดลงทำให้เกิด self-assembly ของพี3เอชทีมากขึ้น ซึ่งนำไปสู่การแยกเฟสและเกิดส่งผลให้การแยกและลำเลียงประจุลดลง ดังนั้นในการเลือกใช้สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงชนิดของคอนจูเกตพอลิเมอร์และตัวทำละลายด้วยเช่นกัน



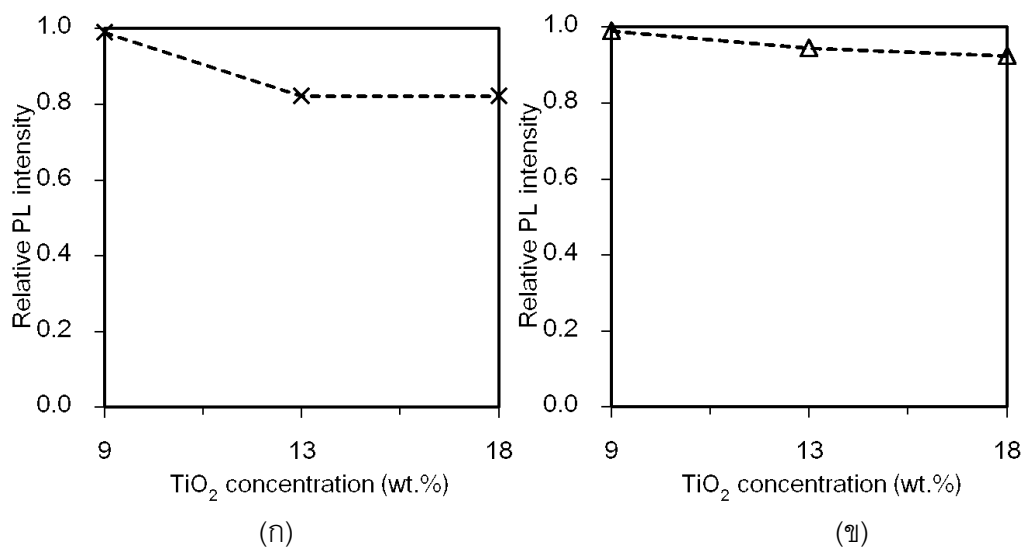
รูปที่ 4.71 สเปกตรากการคายแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 9.04 (—) 13.21 (•••) และ 18.16 (---) โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.72 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพันธ์ (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ



รูปที่ 4.73 สเปกตรากการคายแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 9.04 (—) 13.21 (•••) และ 18.16 (---) โดยน้ำหนัก



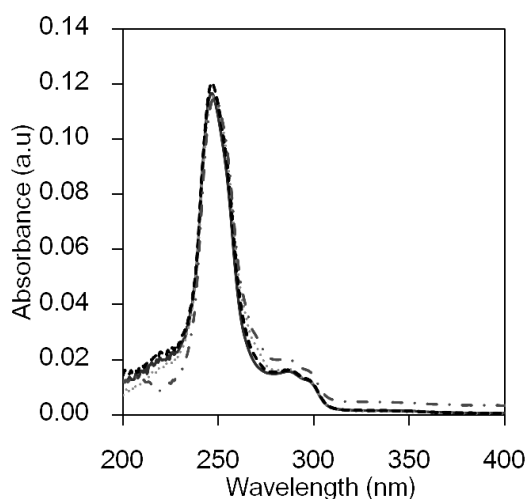
รูปที่ 4.74 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพันธ์ (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน/เมทานอลร้อยละ 20 โดยปริมาตร ที่ปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ

#### 4.7 สมบัติของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์

ลำดับต่อมาเป็นการศึกษาโดยเปลี่ยนตัวทำละลายหลักจากคลอโรเบนซีนเป็นคลอโรฟอร์ม และเตรียมที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อตัวทำละลายคลอโรฟอร์มเท่ากับร้อยละ 0.5 โดยปริมาตร ซึ่งการศึกษาในส่วนนี้แบ่งออกเป็น การศึกษาสมบัติทางกายภาพของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยด้วยการหยดบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ และการศึกษาสมบัติทางกายภาพและแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการหมุนสปินแคสติง และเนื่องจากในการทดลองพบปัญหาว่า ฟิล์มไม่ก่อตัวบนแผ่นควอตซ์สไลด์เมื่อนำสารแขวนลอยไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลเท่ากับร้อยละ 20 และเอทานอลเท่ากับร้อยละ 10 ขึ้นไปมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยวิธีการหมุนสปินแคสติง ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ปรับเปลี่ยนสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ เป็นสัดส่วนของเมทานอลเท่ากับร้อยละ 5 และ 10 โดยปริมาตร และเอทานอลเท่ากับร้อยละ 5 โดยปริมาตร เมื่อใช้ตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม

#### 4.7.1 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์

การศึกษาขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ หลังการกรอง โดยการวัดสมบัติการดูดกลืนด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีพบว่าอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ จะมีค่าการดูดกลืนแสงและตำแหน่งความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนสูงสุดเท่าๆ กันทั้งหมด โดยความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนสูงสุดที่วัดได้จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 246.84 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.75

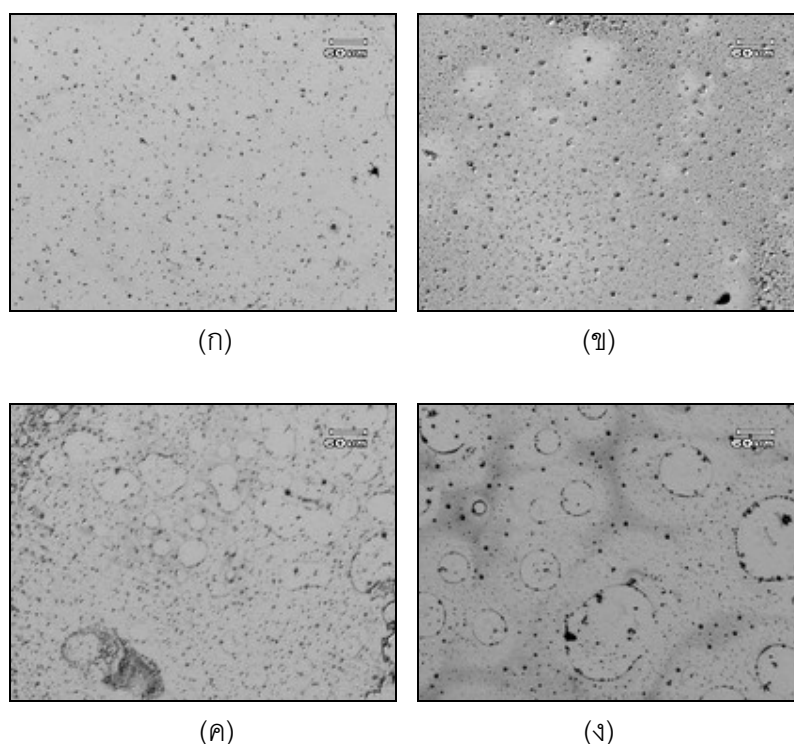


รูปที่ 4.75 การดูดกลืนแสงของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม (—) ตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอลร้อยละ 5 (•••) และ 10 (- - -) โดยปริมาตร และตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เอทานอลร้อยละ 5 (-•-) โดยปริมาตร

#### 4.7.2 สมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัวและขนาดอนุภาคของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

ผลการศึกษาภาพในมุมมองกว้างของสมบัติการกระจายตัวและขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ที่เตรียมโดยการหยดบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ หลังการกรอง ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่า

สารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม และตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์จะมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคใกล้เคียงกัน โดยจะมีอนุภาคขนาดเล็กๆ และกลุ่มของอนุภาคที่เกิดจากการเกาะตัวกันกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวของตัวอย่างที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ หลังจากแห้งแล้วจะเกิดเป็นคราบบนผิว และเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ให้สูงขึ้น จากเมทานอลร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 โดยปริมาตร หรือเปลี่ยนชนิดของแอลกอฮอล์จาก เมทานอลเป็นเอทานอลที่สัดส่วนร้อยละ 5 โดยปริมาตรเท่ากัน พบว่ารอยคราบที่เกิดจากการแห้งตัวเร็วมีมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.76 ทั้งนี้เกิดจากอัตราการระเหยที่เร็วของตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ เนื่องจากตัวทำละลายทั้งหมดมีจุดเดือดที่ต่ำ (จุดเดือดของตัวทำละลายคลอโรฟอร์มเท่ากับ 61.0 องศาเซลเซียส, เมทานอลเท่ากับ 64.5 องศาเซลเซียส และเอทานอลเท่ากับ 78.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ)

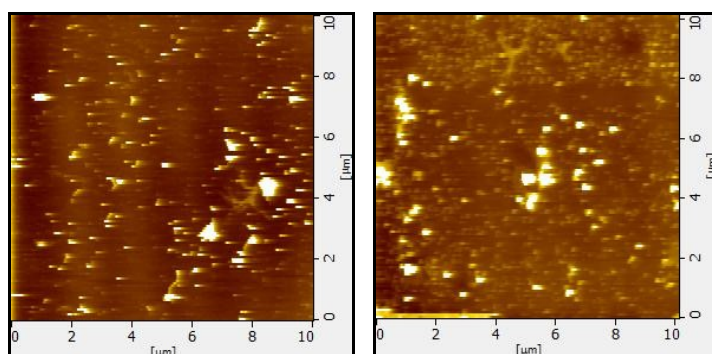


รูปที่ 4.76 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ใน (ก) ตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอล (ข) ร้อยละ 5 และ (ค) ร้อยละ 10 โดยปริมาตร และ (ง) ตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เอทานอลร้อยละ 5 โดยปริมาตร

#### 4.7.3 สมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัว ขนาดอนุภาค และสัณฐานวิทยาของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม

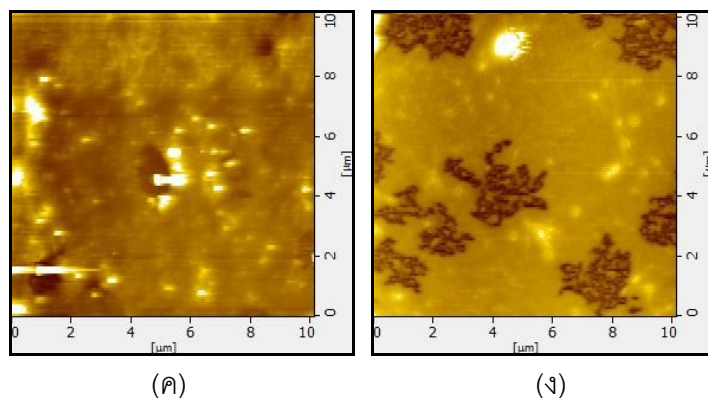
ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพด้านการกระจายตัว ขนาดอนุภาค และสัณฐานวิทยาของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ หลังการกรอง ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมพบว่า สารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มจะมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่มีขนาดเล็กและกลุ่มของอนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดจากการเกาะตัวกันกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว และเมื่อมีการเติมแอลกอฮอล์ลงในสารแขวนลอยพบว่า ตัวทำละลายผสมมีการระเหยเร็วมาก จึงทำให้อนุภาคเคลื่อนที่มารวมกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เอทานอล ดังรูปที่ 4.77 โดยค่าขนาดความกว้างของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้จากการเตรียมสารแขวนลอยในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ดังแสดงในตารางที่ 4.12

เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัว ขนาดอนุภาค และสัณฐานวิทยาของสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มเปรียบเทียบกับสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน ที่สัดส่วนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรพบว่า สารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนจะมีลักษณะการกระจายตัวที่ดีกว่าคือ มีการกระจายตัวของอนุภาคเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ มากกว่า มีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคน้อยกว่า และมีค่าขนาดความกว้างและความสูงโดยเฉลี่ยของอนุภาครวมทั้งความขรุขระของพื้นผิวน้อยกว่าด้วย



(ก)

(ข)



รูปที่ 4.77 ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ใน (ก) ตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอล (ข) ร้อยละ 5 และ (ค) ร้อยละ 10 โดยปริมาตร และ (ง) ตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เอทานอลร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.12 ความขรุขระของตัวอย่าง ขนาดความกว้าง และความสูง ของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์

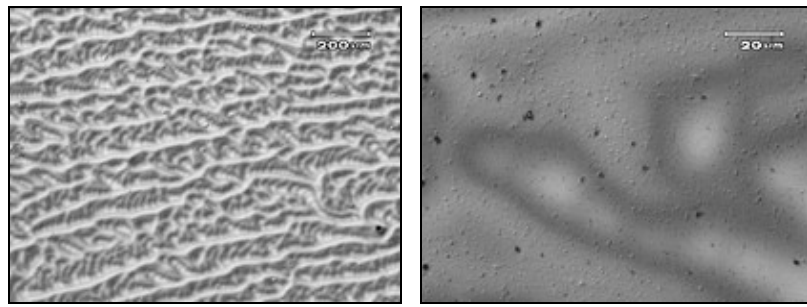
ตัวทำละลาย	สัดส่วนของแอลกอฮอล์ (%v/v)	ความกว้างของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูงของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
คลอโรฟอร์ม	0	126.53±40.10	2.59±2.25	3.78±1.59
คลอโรฟอร์ม/ เมทานอล	5	144.56±25.88	3.56±1.50	15.65±6.38
	10	153.57±27.48	12.42±2.46	19.87±14.18
คลอโรฟอร์ม/ เอทานอล	5	142.64±33.96	7.23±1.80	6.99±3.38



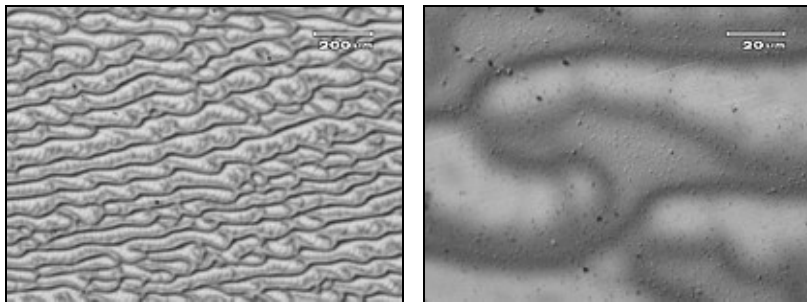
#### 4.8 สมบัติทางกายภาพและแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/ เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/ แอลกอฮอล์

##### 4.8.1 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม ไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสม คลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์

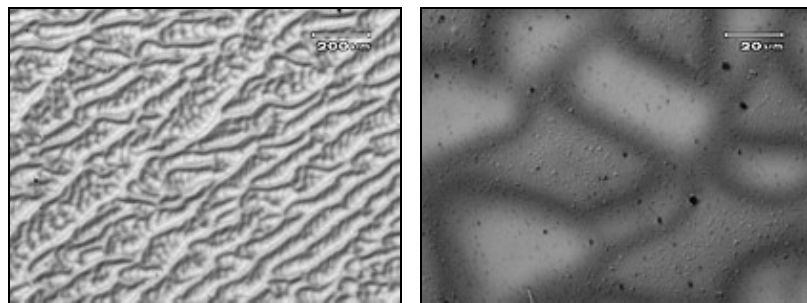
จากการศึกษาภาพมุกกว้างของลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอริกเอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ขึ้นรูปโดยวิธีการหมุนสปินแคสที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที หลังการกรอง ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่า ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มทั้งหมดที่เตรียมได้เมื่อศึกษาด้วยกำลังขยายต่ำ จะมีลักษณะเป็นริ้ว และมีความขรุขระมาก โดยเมื่อเพิ่มกำลังขยายให้สูงขึ้นจะเห็นอนุภาคและกลุ่มของพอลิเมอริกกระจายอยู่ทั่วๆ พื้นผิว ดังรูปที่ 4.78 โดยที่ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มทั้งหมดจะไม่มี ความแตกต่างกันชัดเจนนักแม้ว่าจะมีการเติมแอลกอฮอล์ลงไป ในสารแขวนลอย หรือแม้กระทั่งเปลี่ยนชนิดและสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ก็ตาม ทั้งนี้เกิดจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มมีอัตราการระเหยที่เร็วจึงส่งผลให้ได้ฟิล์มที่มีลักษณะพื้นผิวดังกล่าว ในขณะที่ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนซึ่งมีการระเหยที่ช้ากว่าจึงส่งผลให้มีลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่เรียบกว่า<sup>[99]</sup>



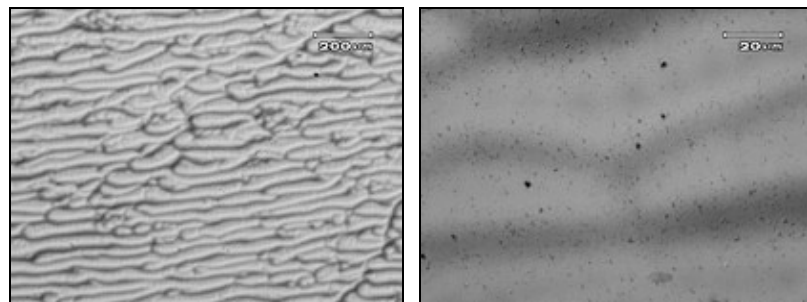
(n)



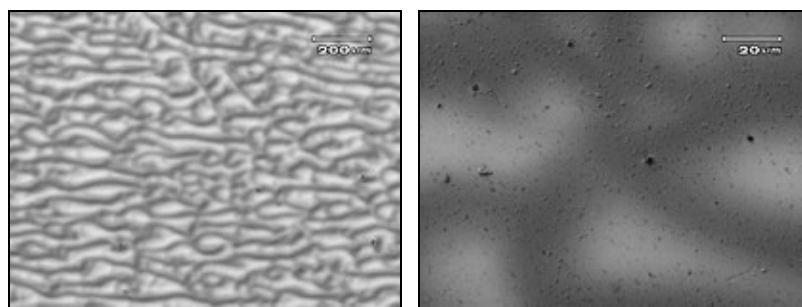
(ni)



(nii)



(niii)



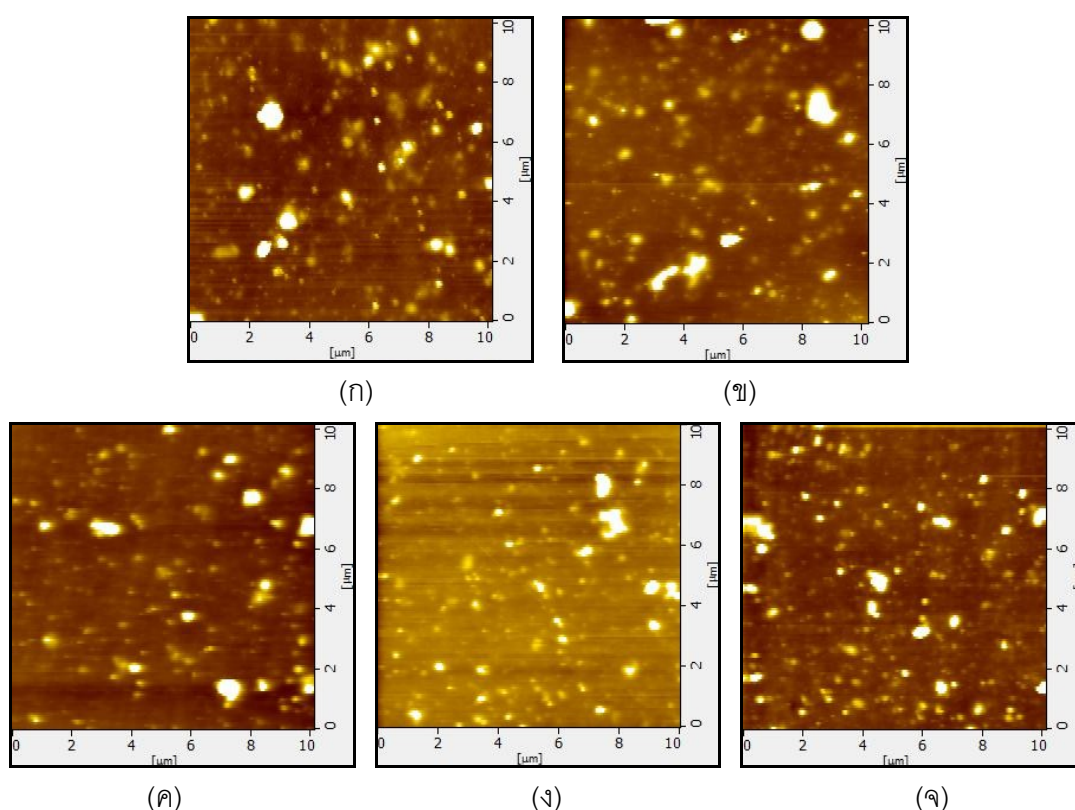
(จ)

รูปที่ 4.78 โครงสร้างพื้นผิวระดับจุลภาคของ (ก) พิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี (ข) พิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม พิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอล (ค) ร้อยละ 5 และ (ง) ร้อยละ 10 โดยปริมาตร และ (จ) ตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอลร้อยละ 5 โดยปริมาตร

#### 4.8.2 สันฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะทางสันฐานวิทยาของฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ หลังการกรอง และขึ้นรูปโดยวิธีการหมุนสปินแคสที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมพบว่า ฟิล์มคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวีจะมีกลุ่มของพอลิเมอร์ที่เกิดการเกาะตัวกันเป็นกลุ่มขนาดค่อนข้างใหญ่กระจายอยู่ทั่วๆ พื้นผิวของฟิล์มและมีความขรุขระน้อยกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ทั้งหมดจะมีลักษณะคล้ายกันคือมีอนุภาคและกลุ่มของพอลิเมอร์เกาะตัวเป็นกลุ่มขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วพื้นผิว ดังรูปที่ 4.79 และเมื่อพิจารณาถึงขนาดความกว้างโดยเฉลี่ยของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์ซึ่งบอกได้ถึงลักษณะการกระจายตัวและการเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคและกลุ่มพอลิเมอร์พบว่า เมื่อมีการเติมแอลกอฮอล์ในสัดส่วนร้อยละ 5 โดยปริมาตรทั้งเมทานอลและเอทานอลลงไป ในสารแขวนลอยจะทำให้ขนาดความกว้างโดยเฉลี่ยของอนุภาคและกลุ่มของพอลิเมอร์ลดลง ในขณะที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลให้สูงขึ้นจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 กลับ

พบว่า ขนาดความกว้างโดยเฉลี่ยของอนุภาคและกลุ่มของพอลิเมอร์สูงขึ้น โดยค่าขนาดความกว้างโดยเฉลี่ยของอนุภาคและกลุ่มของพอลิเมอร์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ที่วัดได้จะอยู่ในช่วง  $171.60 \pm 29.98$  นาโนเมตรถึง  $187.59 \pm 44.34$  นาโนเมตร ความสูงโดยเฉลี่ยของกลุ่มอนุภาคและกลุ่มของพอลิเมอร์อยู่ในช่วง  $3.33 \pm 1.40$  นาโนเมตรถึง  $8.13 \pm 2.87$  นาโนเมตร และความขรุขระของฟิล์มทั้งหมดอยู่ในช่วง  $6.99 \pm 2.83$  นาโนเมตรถึง  $10.17 \pm 2.20$  นาโนเมตร ดังตารางที่ 4.13



รูปที่ 4.79 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของ (ก) ฟิล์มบางคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี (ข) ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอล (ค) ร้อยละ 5 และ (ง) ร้อยละ 10 โดยปริมาตร และ (จ) ตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอลร้อยละ 5 โดยปริมาตร

ตารางที่ 4.13 ขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์

ตัวทำละลาย	สัดส่วนของแอลกอฮอล์ (%v/v)	ความกว้างของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความสูงของอนุภาค (นาโนเมตร)	ความขรุขระ (นาโนเมตร)
คลอโรฟอร์ม	0	182.74±38.38	8.13±2.45	9.96±0.21
คลอโรฟอร์ม/ เมทานอล	5	172.20±37.47	4.31±2.24	10.17±2.20
	10	187.59±44.34	3.33±1.40	7.39±5.44
คลอโรฟอร์ม/ เอทานอล	5	171.60±29.98	8.13±2.87	8.29±3.06

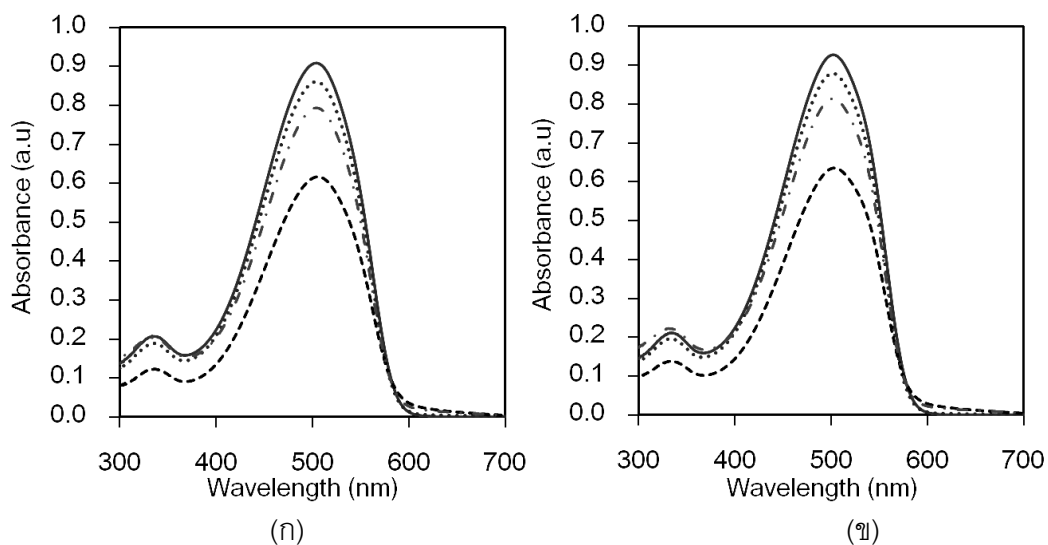
เมื่อเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์กับฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์พบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์จะมีขนาดความกว้าง ความสูงของอนุภาค และความขรุขระของฟิล์มโดยเฉลี่ยมากกว่า เนื่องจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มมีการระเหยที่เร็วกว่าตัวทำละลายคลอโรเบนซีน

#### 4.8.3 สมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์

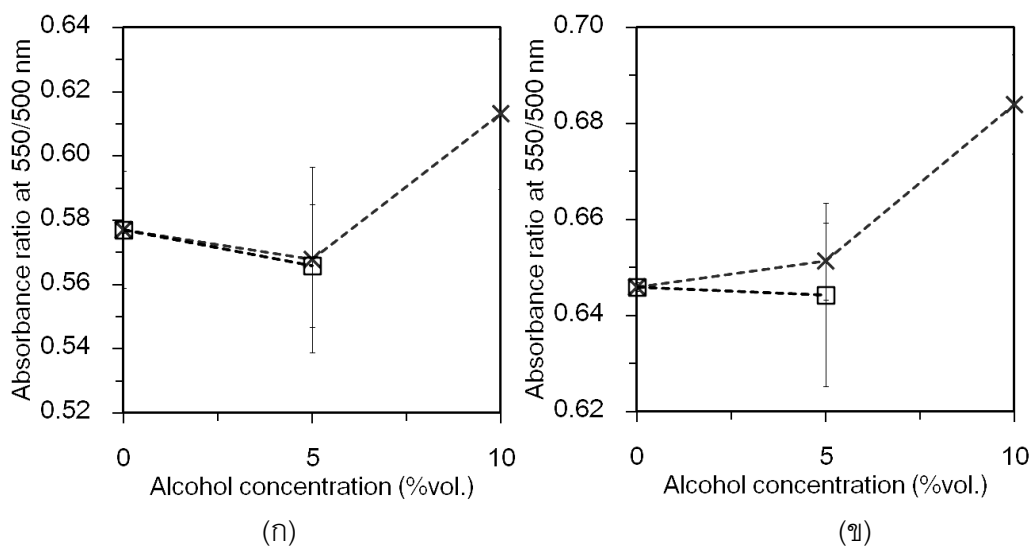
จากการศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ หลังการกรอง และขึ้นรูปด้วยวิธีการหมุนสปินแคสตีงพบว่า สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ทั้งหมดจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันแต่ความสูงของกราฟไม่เท่ากัน โดยฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำ

ละลายคลอโรฟอร์มจะมีค่าการดูดกลืนแสงมากที่สุด และจะมีค่าการดูดกลืนแสงลดลงเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์สูงขึ้น ดังรูปที่ 4.80 (ก) และเมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณการจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์โดยการคำนวณค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร พบว่า การเติมแอลกอฮอล์ทั้งเมทานอลและเอทานอลลงไปในสารแขวนลอยจะส่งผลต่อตำแหน่งยอดที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด ทำให้สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตรของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบมีค่าลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของแอลกอฮอล์ให้สูงขึ้นคือเพิ่มปริมาณของเมทานอลจากสัดส่วนร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 โดยปริมาตร จะทำให้ค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มวัสดุเชิงประกอบอื่นๆ ดังรูปที่ 4.81 (ก) แสดงให้เห็นว่าการเติมแอลกอฮอล์มีผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ภายในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมด้วยตัวทำละลายหลักชนิดคลอโรฟอร์ม

ต่อมานำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ทั้งหมดไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้สายโซ่พอลิเมอร์ภายในฟิล์มเกิดการผ่อนคลายและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปีซึ่งพบว่า ลักษณะของสเปกตรากการดูดกลืนแสงไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากก่อนอบ ดังรูปที่ 4.80 (ข) รวมทั้งค่าสัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตรที่คำนวณได้ก็จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับก่อนอบแต่จะมีค่าสูงกว่าก่อนอบเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.81 (ข) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทางความร้อนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.80 สเปกตรากการดูดกลืนแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอลร้อยละ 5 (•••) และ 10 (---) โดยปริมาตร และตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอลร้อยละ 5 (-•-) โดยปริมาตร



รูปที่ 4.81 สัดส่วนการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550/500 นาโนเมตร (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ชนิด (\*) เมทานอลและ (□) เอทานอล

จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ในหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของคอนจูเกตพอลิเมอร์ในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีทั้งในตัวทำละลายหลักคลอโรเบนซีนและคลอโรฟอร์มจะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เป็นนัยสำคัญเมื่อเทียบกับสมบัติอื่นๆ ของฟิล์ม

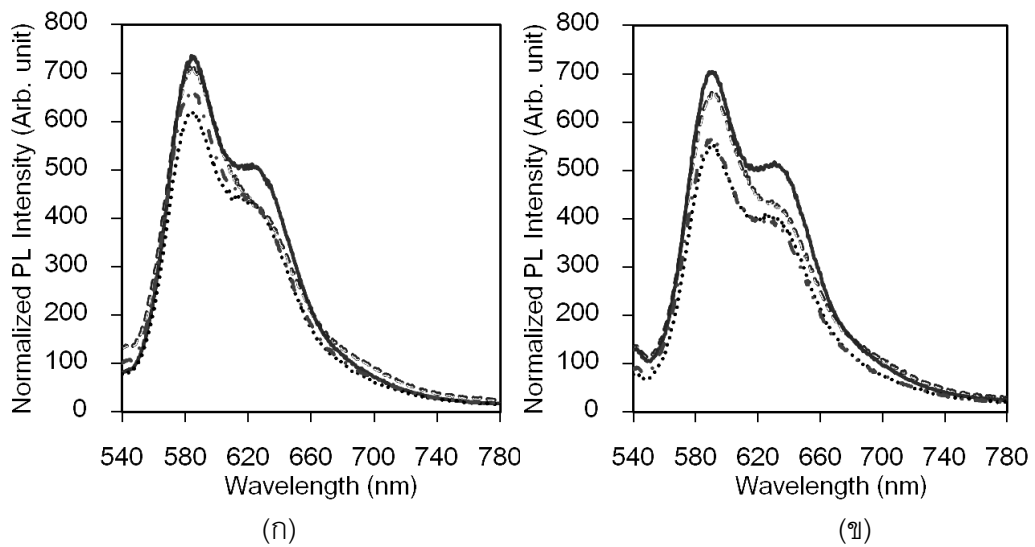
#### 4.8.4 สมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับสมบัติการแยกประจุของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์

จากการศึกษาสมบัติเชิงแสงที่สัมพันธ์กับการแยกประจุด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปีโดยให้การกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรพบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอลร้อยละ 5 โดยปริมาตรจะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้ต่ำที่สุด (ดังรูปที่ 4.82 (ก)) โดยมีค่าลดลงจากค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มประมาณร้อยละ 15 และจะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงสูงขึ้นใกล้เคียงกับฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลเป็นร้อยละ 10 ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม/เมทานอลร้อยละ 5 โดยปริมาตร จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้ลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มประมาณร้อยละ 10 ดังรูปที่ 4.83 (ก)

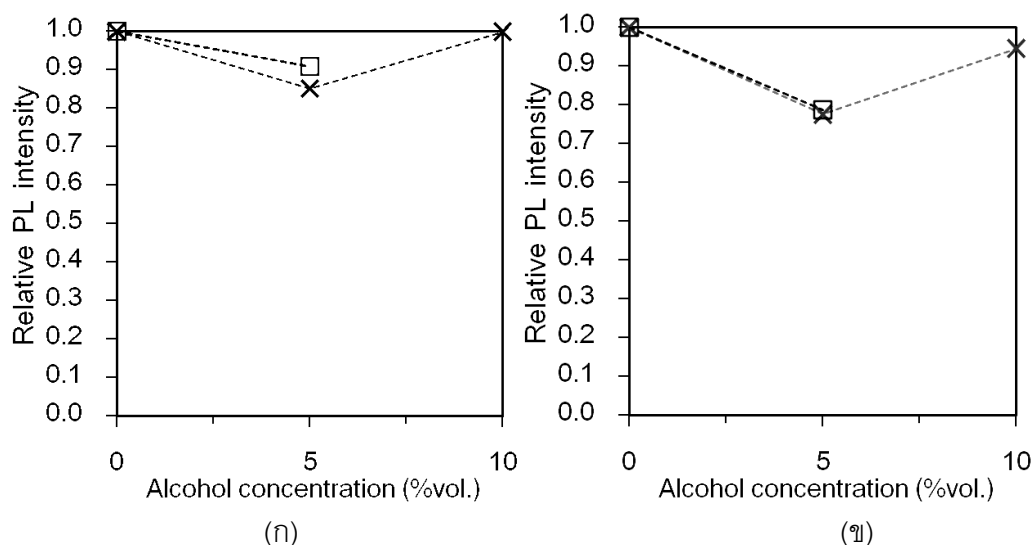
เมื่อนำฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมได้ทั้งหมดไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพบว่า ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกันกับฟิล์มก่อนอบ ดังรูปที่ 4.82 (ข) ทั้งนี้เป็นเพราะตัวทำละลายคลอโรฟอร์มมีจุดเดือดต่ำ ทำให้สามารถระเหยได้เร็ว ส่งผลให้ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบทั้งก่อนอบและหลังอบนั้นไม่แตกต่างกันมาก โดยค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากสารแขวนลอยในตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอลร้อยละ 5 โดยปริมาตร จะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้ลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มประมาณร้อยละ 25 และจะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลเป็น



ร้อยละ 10 ในขณะที่ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากสารแขวนลอยในตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม/เอทานอลร้อยละ 5 โดยปริมาตรจะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้ลดลงจากฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มประมาณร้อยละ 20 ดังรูปที่ 4.83 (ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่า การใช้ตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์จะทำให้ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบลดลงจากฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มเพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคและสัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ทั้งหมดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นสมบัติต่างๆ ของฟิล์มจึงไม่แตกต่างกันมากนัก

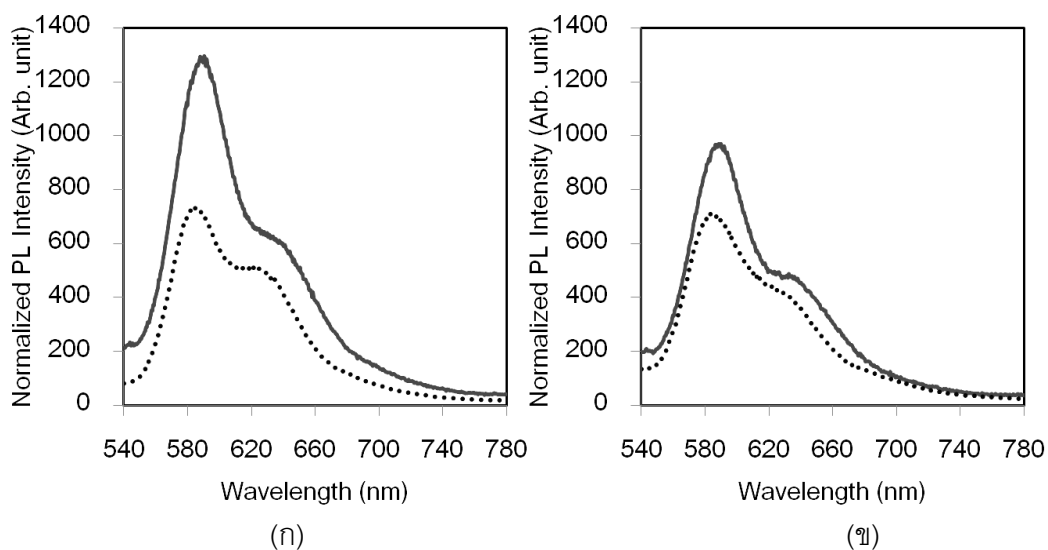


รูปที่ 4.82 สเปกตรากการคายแสง (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบ ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอลร้อยละ 5 (•••) และ 10 (---) โดยปริมาตร และตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอลร้อยละ 5 (-.-) โดยปริมาตร

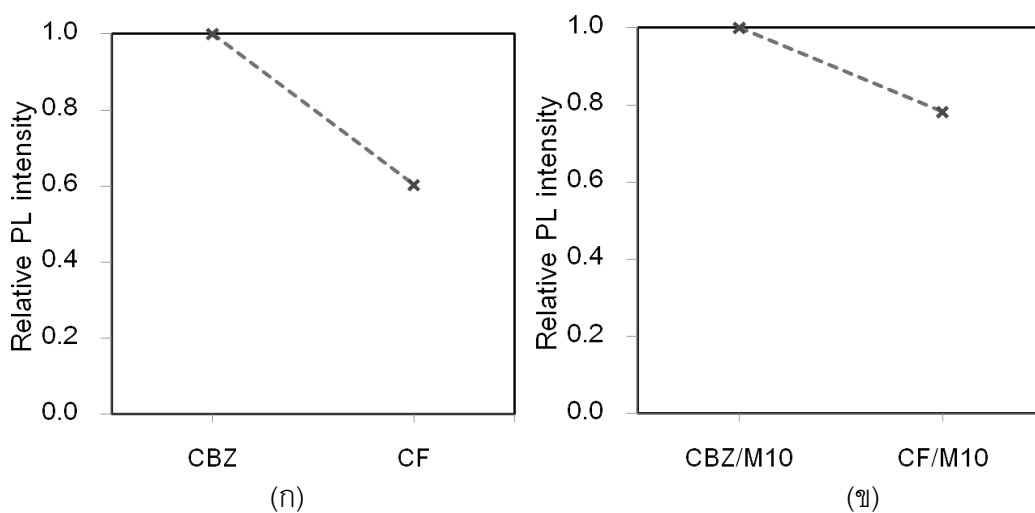


รูปที่ 4.83 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพันธ์ (ก) ก่อนอบ และ (ข) หลังอบของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ชนิด (×) เมทานอล และ (⊠) เอทานอล

เมื่อพิจารณาผลของตัวทำละลายหลักที่ส่งผลต่อสมบัติการคายแสงของฟิล์ม โดยเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม และฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอลที่สัดส่วนของแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตร ที่มีปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากัน พบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายหลักชนิดคลอโรฟอร์มจะมีค่าความเข้มแสงของการคายแสงต่ำกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายหลักชนิดคลอโรเบนซีน ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของอนุภาคที่ต่างกัน เนื่องจากมีอัตราการระเหยของตัวทำละลายที่ต่างกัน การเคลื่อนที่เข้าหากันของอนุภาคที่พบในการใช้ตัวทำละลายคลอโรฟอร์มซึ่งมีการระเหยที่เร็ว อาจจะช่วยให้อนุภาคมีความต่อเนื่องกันมากกว่าการกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ ที่พบในการใช้ตัวทำละลายคลอโรเบนซีน จึงอาจส่งผลให้มีการแยกและลำเลียงประจุได้ดีขึ้น ทำให้ค่าความเข้มแสงของการคายแสงที่วัดได้มีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.84 และ 4.85



รูปที่ 4.84 สเปกตรากายแสงของ (ก) ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (—) และตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม (···) และ (ข) ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอล (—) และตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอล (···) ที่มีสัดส่วนของเมทานอลเท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตร



รูปที่ 4.85 ค่าความเข้มแสงของการคายแสงสัมพันธ์ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีที่เตรียมจาก (ก) ตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและ (ข) ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/เมทานอลและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/เมทานอลที่มีสัดส่วนของเมทานอลเท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตร

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การเติมแอลกอฮอล์ช่วยให้การกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรเบนซีนดีขึ้น โดยแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาวมีแนวโน้มช่วยให้อนุภาคกระจายตัวได้ดีกว่า แต่เมื่อเปลี่ยนสัดส่วนของแอลกอฮอล์ให้สูงขึ้นจากร้อยละ 10 โดยปริมาตร เป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร กลับไม่มีความแตกต่างกันมากนัก
2. การใช้ตัวทำละลายผสมคลอโรเบนซีน/แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนสั้น ซึ่งได้แก่ เมทานอลและเอทานอล ช่วยลดค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบได้มากกว่าการใช้แอลกอฮอล์ชนิด 1-โพรพานอลและ 1-บิวทานอลที่มีหมู่ไฮโดรคาร์บอนยาว ซึ่งทำให้เกิดการตกค้างในฟิล์มเนื่องจากมีจุดเดือดสูง
3. ในกรณีของคอนจูเกตพอลิเมอร์เอ็มอีเอช-พีพีวี การเติมแอลกอฮอล์ไม่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ ดังนั้นสมบัติการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบจะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์เท่านั้น
4. ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวีมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากมีตัวรับอิเล็กตรอนและช่องทางในการขนถ่ายประจุไปยังขั้วไฟฟ้ามากขึ้น
5. ในกรณีของพี3เอชที การเติมแอลกอฮอล์ทำให้ความสามารถในการละลายของพี3เอชทีลดลง จึงทำให้เกิด self-assembly ของพี3เอชทีและการแยกเฟส ทำให้ค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/พี3เอชทีไม่ลดลงแม้จะมีการเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์
6. การกระจายตัวของอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ในตัวทำละลายคลอโรฟอร์มและตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ค่าความเข้มแสงของ

การคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายผสมคลอโรฟอร์ม/แอลกอฮอล์ ลดลงจากฟิล์มที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มเพียงเล็กน้อย

7. ชนิดของตัวทำละลายหลักส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียม ไดออกไซด์/เอ็มอีเอช-พีพีวี โดยพบว่า ฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรเบนซีนจะมีลักษณะพื้นผิวที่เรียกว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ซึ่งมีความขรุขระมากเนื่องจากมีการระเหยที่เร็วกว่า

8. เนื่องจากอัตราการระเหยที่แตกต่างกันของตัวทำละลายคลอโรเบนซีนและตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม จึงทำให้มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มวัสดุเชิงประกอบแตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าความเข้มแสงของการคายแสงของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เตรียมและศึกษาฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์โดยเปลี่ยนชนิดและสัดส่วนโดยปริมาตรของตัวทำละลายผสม
2. เตรียมและศึกษาฟิล์มวัสดุเชิงประกอบไทเทเนียมไดออกไซด์/คอนจูเกตพอลิเมอร์โดยเปลี่ยนชนิดพอลิเมอร์
3. ศึกษาอัตราการเสื่อมสภาพ (degradation) ของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ
4. ศึกษาประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานของฟิล์มวัสดุเชิงประกอบในอุปกรณ์โฟโตวอลเทอิกก่อนนำไปใช้งานจริง

## รายการอ้างอิง

- [1] Saunders, B. R., Turner, M. L. Nanoparticle–polymer photovoltaic cells. Advances in Colloid and Interface Science 138 (2008) : 1–23.
- [2] Michael, D. M. Nanostructured Organic–Inorganic Hybrid Solar Cells. MRS BULLETIN 34 (2009) : 95–100.
- [3] Jincheng, L., Wengli, W., Huangzhong, Y., Zhonglian, W., Junbiao, P., Yong, C. Surface ligand effects in MEH-PPV/TiO<sub>2</sub> hybrid solar cells. Solar Energy Materials & Solar Cells 92 (2008) : 1403–1409.
- [4] Hyun, J. H., Jung, M. K., Kang, C. J., Yong, S. K. Hybrid photovoltaic cell with well-ordered nanoporous titania–P3HT by nanoimprinting lithography. Journal of Physics and Chemistry of Solids 69 (2008) : 1301–1304.
- [5] Baek, W. H., Seo, L., Yoon, T. S., Lee, H. H., Yun, C. M., Kim, Y. S. Hybrid inverted bulk heterojunction solar cells with nanoimprinted TiO<sub>2</sub> nanopores. Solar Energy Materials & Solar Cells 93 (2009) : 1587–1591.
- [6] Kim, Y.S. et al. Effect of solvents on the performance and morphology of polymer photovoltaic devices. Current Applied Physics 10 (2010) : 985–989
- [7] Rhodes, R. et al. Hybrid polymer solar cells: from the role colloid science could play in bringing deployment closer to a study of factors affecting the stability of non-aqueous ZnO dispersions. Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects 343 (2009) : 50-60.
- [8] เรื่องของพลังงาน. ความรู้เกี่ยวกับแสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar\\_knowledge.php](http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar_knowledge.php)  
[7 เมษายน 2555]
- [9] พลังงาน, กระทรวง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. การประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.ces.kmutt.ac.th/PV\\_text/Operator\\_CH1toCH5.pdf](http://www.ces.kmutt.ac.th/PV_text/Operator_CH1toCH5.pdf) [7 เมษายน 2555]
- [10] Wang, X., Liu, D., Li, J. Organic photovoltaic materials and thin-film solar Cells. Front. Chem. China 5 (2010) : 45–60.

- [11] Sariciftci, N. S. et al. Sensitization of the photoconductivity of conducting polymers by C60: Photoinduced electron transfer. *Phys. Rev. B* **48** (1993) : 15425–15433.
- [12] Halls, J. J. M., Friend, R. H. The photovoltaic effect in a poly(p-phenylenevinylene)/perylene heterojunction. *Synth. Met.* **85** (1997) : 1307–1308.
- [13] Yu, G., Pakbaz, K., Heeger, A. J. Photonic devices made with semiconducting conjugated polymers: New developments. *Synth. Met.* **71** (1995) : 2241–2242.
- [14] Stalmach, U., Boer, B. D., Videlot, C., Hutten, P. F. V., Hadziioannou, G. Semiconducting Diblock Copolymers Synthesized by Means of controlled radical polymerization techniques. *J. Am. Chem. Soc.* **112** (2000) : 5464–5472.
- [15] ไททานี : ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบใช้แสงร่วม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.vcharkarn.com/varticle/27809> [7 เมษายน 2555]
- [16] เรื่องทั่วไปเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานไททานี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.oknation.net/blog/print.php?id=202892> [7 เมษายน 2555]
- [17] Mineral Structure and Property Data TiO<sub>2</sub> Group. [Online]. Available from: <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html> [2012, April 7]
- [18] Arango, A. C., Carter, S. A., Brock, P. J. Charge transfer in photovoltaics consisting of interpenetrating networks of conjugated polymer and TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Appl. Phys. Lett.* **74** (1999) : 1698–1700.
- [19] ราชบัณฑิตยสถาน. พจนานุกรม ศัพท์พอลิเมอร์ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ราชบัณฑิตยสถาน, 2551.
- [20] Herrera, F. S. Electrochemistry–conducting polymer–Marco. [Online]. Available from: <http://www.eolss.net/Eloss-sampleAllChapter.aspx> [2012, April 7]

- [21] Kerdcharoen, T., Conductive Plastics. [Online]. Available from:  
<http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/pe-thailand/condplastic.html>  
 [2012, April 7]
- [22] Traiphol, R., Charoenthai, N., Srihirin, T., Kerdcharoen, T., Osotchan, T.,  
 Matusos, T. Chain organization and photophysics of conjugated polymer  
 in poor solvents: Aggregates, agglomerates and collapsed coils.  
Polymer 48 (2007) : 813–826.
- [23] Electronic Devices : OTFT. [Online]. Available from: <http://www.orgalight.com/Orgalight/PageSite/electronic.php> [2012, April 7]
- [24] สารกึ่งตัวนำ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.cpe.eng.cmu.ac.th/wp-content/uploads/CPE213\\_02\\_2554\\_2.pdf](http://www.cpe.eng.cmu.ac.th/wp-content/uploads/CPE213_02_2554_2.pdf) [7 เมษายน 2555]
- [25] อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับวิศวกรรมคอมพิวเตอร์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
[http://www.cpe.eng.cmu.ac.th/wp-content/uploads/CPE213\\_02\\_2554\\_2.pdf](http://www.cpe.eng.cmu.ac.th/wp-content/uploads/CPE213_02_2554_2.pdf) [7 เมษายน 2555]
- [26] อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-07.html> [7 เมษายน 2555]
- [27] เล็ก สีคง. Engineering ceramic. สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ  
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2545.
- [28] Srilomsak, S. Stabilization of Ceramic Slip I and II. Suranaree J. Sci. Technol.  
13 (2006) : 259–270.
- [29] Bae, H. S., Lee, M. K., Kim, W. W., Rhee, C. K. Dispersion properties of TiO<sub>2</sub>  
 nano-powder synthesized by homogeneous precipitation process at  
 low temperatures. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and  
 Engineering Aspects 220 (2003) : 167-177.
- [30] Zeta Potential and Introduction in 30 Minutes. [Online]. Available from:  
<http://www.nbtc.cornell.edu/facilities/downloads/Zeta%20potential%20-%20An%20introduction%20in%2030%20minutes.pdf>  
 [2012, April 7]



- [31] Electrostatic stabilization. [Online]. Available from: [http://depts.washington.edu/solgel/pages/courses/MSE\\_502/Electrostatic\\_Stabilization.html](http://depts.washington.edu/solgel/pages/courses/MSE_502/Electrostatic_Stabilization.html)  
[2012, April 7]
- [32] Parfitt, G. D. Dispersion of Powders in Liquids with Special Reference to Pigments. London : Applied Science, 1981.
- [33] Suspension and Emulsion Stability. [Online]. Available from:  
<http://www.colloidaldispersions.com/shortcourse/private/Chicago07/Lecture%20%20Suspension%20and%20emulsion%20stability.pdf>  
[2012, April 7]
- [34] มหาวิทยาลัยมหิดล. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ออนไลน์. UV-Vis สเปกโตรสโกปีและการวัดการดูดกลืนแสง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4\\_1.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4_1.html) [7 เมษายน 2555]
- [35] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. UV/VIS Spectroscopy. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.nanotec.or.th/th/?page\\_id=575](http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=575) [7 เมษายน 2555]
- [36] เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.aquatoyou.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=532:-uv-vis-pectrophotometer&catid=54:2010-03-29-03-57-47&Itemid=61](http://www.aquatoyou.com/index.php?option=com_content&view=article&id=532:-uv-vis-pectrophotometer&catid=54:2010-03-29-03-57-47&Itemid=61) [7 เมษายน 2555]
- [37] ลาวัลย์ ศรีพงษ์. อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโตรสโกปี. พิมพ์ครั้งที่ 2. นครปฐม : ภาควิชาเภสัชเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2543.
- [38] สเปกโตรสโกปีในสารประกอบอินทรีย์ อัลตราไวโอเลตสเปกโตรสโกปี (Ultraviolet Spectroscopy). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-9.pdf> [7 เมษายน 2555]
- [39] สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. Atomic Force Microscope (AFM). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/219-atomic-force-microscope-afm> [7 เมษายน 2555]

- [40] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. Atomic Force Microscope. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.nanotec.or.th/th/?page\\_id=545](http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=545) [7 เมษายน 2555]
- [41] ธีราพร พันธุ์ธีรานุรักษ์. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ และศูนย์นาโนชาชนและนาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหิดล. การศึกษาทางชีววิทยาสมัยใหม่ด้วยเครื่อง Atomic Force Microscopy. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.vcharkarn.com/varticle/38293> [7 เมษายน 2555]
- [42] Atomic Force Microscope. [Online]. Available from: [http://www.mf.mpg.de/en/abteilungen/dosch/barrena/spm-principle\\_en.shtml](http://www.mf.mpg.de/en/abteilungen/dosch/barrena/spm-principle_en.shtml) [2012, April 7]
- [43] Atomic Force Microscope. [Online]. Available from: <http://elchem.kaist.ac.kr/jhkwak/topometrixweb/afmodes1.htm> [2012, April 7]
- [44] Atomic Force Microscope. [Online]. Available from: <http://www.anasys.co.uk/library/afm1.htm> [2012, April 7]
- [45] มหาวิทยาลัยมหิดล. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ออนไลน์. เทคโนโลยีการสร้างระดับนาโน [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/scibook/nanotech/Page/Unit4-3.html> [7 เมษายน 2555]
- [46] Binnig, G., Quate, C. F., Gerber, C. Atomic force microscope. Physical Review Letters 56 (1986) : 930–933.
- [47] Atomic Force Microscope. [Online]. Available from: <http://bionems.cloud.ntu.edu.tw/research1-31.php> [2012, April 7]
- [48] มหาวิทยาลัยมหิดล. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ออนไลน์. UV-Vis สีและแสงการวัดการดูดกลืน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4\\_5.html](http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/color-light/page4_5.html) [7 เมษายน 2555]
- [49] ลาวัลย์ ศรีพงษ์. การวิเคราะห์เชิงฟลูออโรเมตรี. นครปฐม : ภาควิชาเภสัชเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2544.
- [50] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. Fluorescence Spectroscopy. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.nanotec.or.th/th/?page\\_id=565](http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=565) [7 เมษายน 2555]

- [51] ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. Introduction to Spectroscopic Methods. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [mis.sc.chula.ac.th/ChemII1\\_2.ppt](http://mis.sc.chula.ac.th/ChemII1_2.ppt) [7 เมษายน 2555]
- [52] ผศ.สุชาติ จุฑามณี. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. Luminescence Spectroscopy. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [mis.sc.chula.ac.th/ChemII3.ppt](http://mis.sc.chula.ac.th/ChemII3.ppt) [7 เมษายน 2555]
- [53] แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2535.
- [54] ณรงค์ ไชยสุต. เคมีวิเคราะห์. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2533.
- [55] Valeur, B. Molecular Fluorescence: Principles and Applications. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001.
- [56] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. คู่มือหลักสูตรเข้มข้นการวิเคราะห์โดยใช้ Fourier Transform Infrared Spectrometer. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [57] เกษร พะลัง, สุพันธ์ ชัยนะกุล. เคมีอินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [58] เสนีย์ เครือเนตร. IR and FTIR. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://cyberclass.msu.ac.th/cyberclass/cyberclass-uploads/libs/document/IR\\_2299.pdf](http://cyberclass.msu.ac.th/cyberclass/cyberclass-uploads/libs/document/IR_2299.pdf) [7 เมษายน 2555]
- [59] อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf> [7 เมษายน 2555]
- [60] Allen, T. Particle Size Measurement. 3<sup>rd</sup> ed. New York : Chapman and Hall, 1981.
- [61] Stephen, W. S. The Importance of Particle Sizing in the Ceramic Industry. In Ceramic Suppliers Meet Ceramic Manufacturers, 2000.
- [62] Laser light scattering. [Online]. Available from: [http://www.malvern.com/LabEng/technology/laser\\_diffraction/particle\\_sizing.htm](http://www.malvern.com/LabEng/technology/laser_diffraction/particle_sizing.htm) [2012, April 7]

- [63] Static laser light scattering. [Online]. Available from: <http://www.retsch-technology.com/rt/applications/technical-basics/static-laser-light-scattering> [2012, April 7]
- [64] อารี ธนบุญสมบัติ, ภัทราวรรณ คหะวงศ์, ศุภมาส ต้านวิทยากุล. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.mtec.or.th/laboratory/powder/images/stories/documents/format.doc> [7 เมษายน 2555]
- [65] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. Thermogravimetric Analysis (TGA). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.mtec.or.th/laboratory/ta/index.php/tools-and-services/13> [7 เมษายน 2555]
- [66] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. Thermogravimetric Analysis (TGA). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.nanotec.or.th/th/?page\\_id=569](http://www.nanotec.or.th/th/?page_id=569) [7 เมษายน 2555]
- [67] Principles for Thermogravimetric Analysis (TGA). [Online]. Available from: <http://webpages.scu.edu/ftp/adalsteinsson/GroupSite/Methods/DSCinfo/page30/page30.html> [2012, April 7]
- [68] Nanoparticle characterization using light scattering technologies. [Online]. Available from: [http://www.ioc.fiocruz.br/peptides2008/pdf/light\\_scattering.pdf](http://www.ioc.fiocruz.br/peptides2008/pdf/light_scattering.pdf) [2012, April 7]
- [69] Zeta Potential. [Online]. Available from: <http://www.zetamatrix.com/theory/theory.html> [2012, April 7]
- [70] Zeta Potential. [Online]. Available from: <http://www.colloidmeasurements.com/zeta.html> [2012, April 7]
- [71] Weiner, B. B., Tscharnuter, W. W., Fairhurst, D. Zeta Potential: A New Approach. In Canadian Mineral Analysts Meeting, 1993.
- [72] การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เชิงปฏิบัติ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://physics.kku.ac.th/solid/sites/default/files/Chapter-4\\_Practical\\_XRD.pdf](http://physics.kku.ac.th/solid/sites/default/files/Chapter-4_Practical_XRD.pdf) [7 เมษายน 2555]

- [73] X-Ray Diffraction. [Online]. Available from: <http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/ELTC2103/termwork/xrd/index.html> [2012, April 7]
- [74] สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. X-ray Diffractometer (XRD). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf\\_XRD1.htm](http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm) [7 เมษายน 2555]
- [75] Aydil, S. E. Nanomaterials for Solar Cells. Nanotechnology Law & Business 4 (2007) : 275-291.
- [76] Park, I. et al. Enhanced photovoltaic performance of ZnO nanoparticle/poly(phenylene vinylene) hybrid photovoltaic cells by semiconducting surfactant. Organic Electronics 12 (2011) : 424–428.
- [77] Lin, Y. Y. et al. Interfacial Nanostructuring on the Performance of Polymer/TiO<sub>2</sub> Nanorod Bulk Heterojunction Solar Cells. J. AM. CHEM. SOC. 131 (2009) : 3644–3649.
- [78] Zeng, T. W. Liu, I. S., Hsu, F. C., Huang, K. T., Liao, H. C., Su, W. F. Effects of bifunctional linker on the performance of P3HT/CdSe quantum dot-linker-ZnO nanocolumn photovoltaic device. Optical Society of America 18 (2010) : A357–A365.
- [79] Chang, Y. M., Su, W. F., Wang, L. Photoactive Polythiophene: Titania Hybrids with Excellent Miscibility for Use in Polymer Photovoltaic Cells. Macromolecular Rapid Communications 29 (2008) : 1303–1308.
- [80] Shim, H. S. et al. Efficient photovoltaic device fashioned of highly aligned Multilayers of electrospun TiO<sub>2</sub> nanowire array with conjugated polymer. APPLIED PHYSICS LETTERS 92 (2008) : 183107-1–183107-3.
- [81] Beek, W. J. E., Weink, M. M., Janssen, R. A. J. Efficient Hybrid Cell from Zinc Oxide Nanoparticles and a Conjugated Polymer. Advanced Materials 16 (2004) : 1009–1013.

- [82] Hirunprateep, T., Traiphol, N., Potai, R., Traiphol, R. Improvement of dispersion state and charge separation efficiency of hybrid films of ZnO nanoparticles/conjugated polymers by utilizing methanol as a volatile dispersant. Synthetic Metals **162** (2012) : 44– 48.
- [83] Zeng, T. W., Lo, H. H., Chang, C. H., Lin, Y. Y., Chen, C. W., Su, W. F. Hybrid poly(3-hexylthiophene)/titanium dioxide nanorods material for solar cell applications. Solar Energy Materials & Solar Cells **93** (2009) : 952–957.
- [84] Tseng, T. W., Su, W. F., Chen, C. W., Lin, Y. Y. Photovoltaic devices with nanostructure/conjugated polymer hybrid layer and its matched electron transporting layer. In Patent application publication US2008/0041447 A1, 2008.
- [85] Katt, A., Venna, S. R., Carreon, M. A. Self-assembly hydrothermal assisted synthesis of mesoporous anatase in the presence of ethylene glycol. Catalysis Communications **10** (2009) : 2036–2040.
- [86] Kemary, M. E., Moneam, Y. A., Madkour, M., Mehasse, I. E. Enhanced photocatalytic degradation of Safranin-O by heterogeneous nanoparticles for environmental applications. Journal of Luminescence **131** (2011) : 570–576.
- [87] Korake, P. V., Hankare, P. P., Bamane, S. R., Garadkar, K. M., Shirke, B. S. Synthesis and characterization of pure anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles. J Mater Sci: Mater Electron **22** (2011) : 821–824.
- [88] Thamaphat, K., Limsuwan, P., Ngotawornchai, B. Phase Characterization of TiO<sub>2</sub> Powder by XRD and TEM. Kasetsart J. (Nat. Sci.) **42** (2008) : 357 – 361.
- [89] Park, S. J., Kang, Y. C., Park, J. Y., Evans, E. A., Ramsier, R. D., Chase, G. G. Physical Characteristics of Titania Nanofibers Synthesized by Sol-Gel and Electrospinning Techniques. Journal of Engineered Fibers and Fabrics **5** (2010) : 50-56.

- [90] Reddy, K. M., Manorama, S. V., Reddy, A. R. Materials Bandgap studies on anatase titanium dioxide nanoparticles. Materials chemistry and physics **78** (2002) : 239-245.
- [91] Khanna, P.K., Singh, N., Charan, S. Synthesis of nano-particles of anatase-TiO<sub>2</sub> and preparation of its optically transparent film in PVA. Materials Letters **61** (2007) : 4725–4730.
- [92] Xu, J., Li, L., Yan, Y., Wang, H., Wang, X., Fu, X., Li, G. Synthesis and photoluminescence of well-dispersible anatase TiO<sub>2</sub> nanoparticles. Journal of Colloid and Interface Science **318** (2008) : 29–34.
- [93] Baek, S. Y., Chai, S. Y., Hur, K. S., Lee, W. I. Synthesis of Highly Soluble TiO<sub>2</sub> Nanoparticle with Narrow Size Distribution. Bull. Korean Chem. Soc. **26** (2005) : 1333-1334.
- [94] Mandzy, N., Grulke, E., Druffel, T. Breakage of TiO<sub>2</sub> agglomerates in electrostatically stabilized aqueous dispersions. Powder Technology **160** (2005) : 121 – 126.
- [95] Goodwin, J. W., Lawson, E. J., Mills, P. D. A., Vincent, B., Chadwick, M. D. Surface charge properties of colloidal titanium dioxide in ethylene glycol and water. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects **203** (2002) : 229–236.
- [96] Kim, S. S., Jo, J., Chun, C., Hong, J. C., Kim, D. Y. Hybrid solar cells with ordered TiO<sub>2</sub> nanostructures and MEH-PPV. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry **188** (2007) : 364–370.
- [97] Coates, J. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. Encyclopedia of Analytical Chemistry (2000) : 10815–10837.
- [98] Plyler, E. K. Infrared Spectra of Methanol, Ethanol, and rz-Propanol. Journal of Research of the National Bureau of Standards **48** (1952) : 281-286.

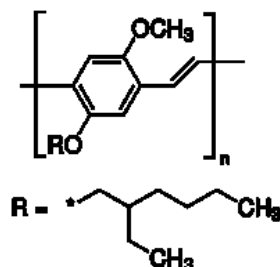
- [99] Kwong, C.Y., Chui, P.C., Cheng, K. W. W., Chan, K. Influence of solvent on film morphology and device performance of poly(3-hexylthiophene):TiO<sub>2</sub> nanocomposite solar cells. Chemical Physics Letters 384 (2004) : 372–375.
- [100] Barbarella, G., Bongini, A., Zambianchi, M. Regiochemistry and Conformation of Poly(3-hexylthiophene) via the Synthesis and the Spectroscopic Characterization of the Model Configurational Triads. Macromolecules 27 (1994) : 3039–3045.
- [101] Das, N. Ch., Sokol, P. E. Hybrid photovoltaic devices from regioregular Polythiophene and ZnO nanoparticles composites. Renewable Energy 35 (2010) : 2683-2688.
- [102] Motaung, D. E., Malgas, G. F., Arendse, C. J. Mavundla, S. E., Knoesen, D. Structural and photo-physical properties of spin-coated poly(3-hexylthiophene) thin films. Materials Chemistry and Physics 116 (2009) : 279–283.
- [103] Kobashi, M., Takeuchi, H. Structural inhomogeneity of non-regioregular poly(3hexylthiophene) in a solution and solid films structures and electronic properties. Synthetic Metals 101 (1999) : 585-586.
- [104] Full width at half maximum (FWHM). [Online]. Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Full\\_width\\_at\\_half\\_maximum](http://en.wikipedia.org/wiki/Full_width_at_half_maximum) [2012, April 7]
- [105] Titanium dioxide. [Online]. Available from: [http://www.geocities.jp/ohba\\_lab\\_ob\\_page/structure6.html](http://www.geocities.jp/ohba_lab_ob_page/structure6.html) [2012, April 7]
- [106] Synthesis, characterization and applications of nanomaterials in the field of Photocatalysis. [Online]. Available from: <http://www.grin.com/en/e-book/175947/synthesis-characterization-and-applications-of-nanomaterials-in-the-field> [2012, May 4]
- [107] Diebold, U. The surface science of titanium dioxide. Surface Science Reports 48 (2003) : 53-229.



- [108] Ibrahim, U. G., Abdullah, A. H. Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 9 (2008) : 1–12.

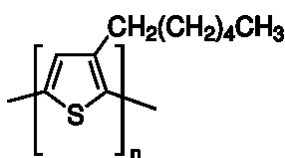
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก สมบัติของคอนจูเกตพอลิเมอร์ MEH-PPV (Sigma-Aldrich; 541443-1g)



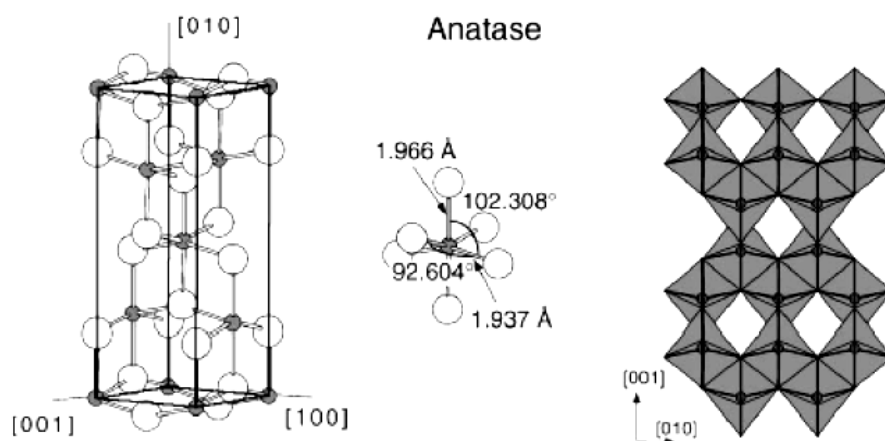
Formula	$(C_{18}H_{28}O_2)_n$
Molecular weight	average $M_n$ 40,000-70,000
Polydispersity	$M_w/M_n \sim 6$
Form	granules
Color	dark brown, red
Fluorescence	$\lambda_{ex}$ 493 nm; $\lambda_{em}$ 554 nm in toluene
Density	1.0 g/mL at 25 °C

ภาคผนวก ข สมบัติของคอนจูเกตพอลิเมอร์ P3HT (Sigma-Aldrich; 445703-1g)



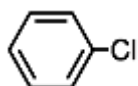
Formula	$(C_{10}H_{14}S)_n$
Molecular weight	average $M_n$ 30,000-60,000
Form	solid
Color	black
Fluorescence	$\lambda_{ex}$ 443 nm; $\lambda_{em}$ 568 nm in chloroform
Conductivity	$\sim 103$ S/cm (when doped with iodine)
Melting Point	238 °C
Density	1.1 g/mL at 25 °C

ภาคผนวก ค สมบัติของอนุภากระดับนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Sigma-Aldrich; 637654) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) เป็นสารอนินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ มีลักษณะเป็นผงของแข็ง สีขาว โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบอะนาทาส<sup>[105]</sup>



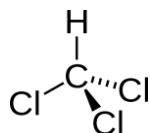
Molecular weight	79.87 g/mol
Assay	99.7% trace metals basis
Form	nanopowder
Particle size	<25 nm
Surface area	spec. surface area 200-220 $\text{m}^2/\text{g}$
Melting Point	1825 °C
Density	3.9 g/mL at 25 °C
Bulk density	0.04 - 0.06 g/ml

**ภาคผนวก ง** สมบัติของตัวทำละลายคลอโรเบนซีน (RCI Labscan (AR Grade); AR1026)  
คลอโรเบนซีน (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>Cl) เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้วหรือมีขั้วน้อยมาก อยู่ในรูปของของเหลวใส ไม่มีสี ไร้ไฟ และมีกลิ่นฉุน



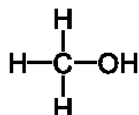
Molecular weight	112.56 g/mol
Assay	99.5 % min.
Form	Liquid
Color	Colorless
Odor	Benzene-like
pH Value	Neutral at 20 °C
Boiling point/range	132 °C
Melting point/range	-45 °C
Flash point	28 °C (closed cup)
Ignition temperature	590 °C
Explosion limits	lower 1.3 vol.% upper 11 vol.%
Vapor pressure	12 hPa at 20 °C
Density	1.110 g/ml at 20 °C
Refractive index	1.52 at 20 °C
Viscosity	0.80 cP at 20 °C
Dielectric constant	5.62 at 25 °C
Dipole moment	1.54 D at 25 °C
Polarity index (P')	2.7
Solubility in Water	0.5 g/l at 20 °C
DOT Hazard Class	3, Flammable Liquid

**ภาคผนวก จ** สมบัติของตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม (RCI Labscan (AR Grade); AR1027E) คลอโรฟอร์ม ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่จัดอยู่ในประเภทสารมีพิษ มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่ติดไฟ และมีกลิ่นเฉพาะตัว หากสูดดมมากอาจทำให้สลบได้



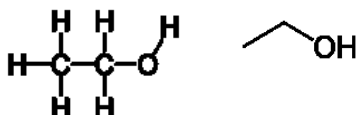
Molecular weight	119.38 g/mol
Assay	99.8 % min. Stabilized with about 1% ethanol
Form	Liquid
Color	Colorless
Odor	Sweetish
pH Value	Not available
Boiling point/range	61 °C
Melting point/range	-63 °C
Flash point	Not flammable
Ignition temperature	Not combustible
Explosion limits	Not applicable
Vapor pressure	213 hPa at 20 °C
Density	1.489 g/ml at 20 °C
Refractive index	1.45 at 20 °C
Viscosity	0.57 cP at 20 °C
Dielectric constant	4.81 at 20 °C
Dipole moment	1.15 D at 25 °C
Polarity index (P')	4.1
Solubility in Water	8 g/l at 20 °C
DOT Hazard Class	6.1, Toxic

**ภาคผนวก จ** สมบัติของเมทานอล (RCI Labscan (AR Grade); AR1115) เมทานอลหรือเมทิลเมทิลแอลกอฮอล์ ( $\text{CH}_3\text{-OH}$ ) เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ในกลุ่มของแอลกอฮอล์ มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายบางชนิด มีความไวไฟสูง เป็นพิษ ระเหยง่าย นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิงและตัวทำละลาย



Molecular weight	32.04 g/mol
Assay	99.9 % min.
Form	Liquid
Color	Colorless
Odor	Characteristic
pH Value	Not available
Boiling point/range	64.5 °C
Melting point/range	-98 °C
Flash point	11 °C (closed cup)
Ignition temperature	455 °C
Explosion limits	lower 5.5 vol.% upper 36.5 vol.%
Vapor pressure	128 hPa at 20°C
Density	0.792 g/ml at 20 °C
Refractive index	1.33 at 20 °C
Viscosity	0.597 cP at 20 °C
Dielectric constant	32.70 at 25 °C
Dipole moment	2.87 D at 20 °C
Polarity index (P')	5.1
Solubility in Water	Soluble
DOT Hazard Class	3, Flammable Liquid and poison

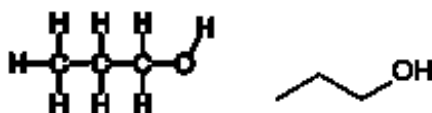
**ภาคผนวก ข** สมบัติของเอทานอล (RCI Labscan (AR Grade); AR1069) เอทานอลหรือเอทิลแอลกอฮอล์ ( $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ ) เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ในกลุ่มของแอลกอฮอล์ มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ติดไฟง่าย สามารถละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายบางชนิด เช่น อีเทอร์ คลอโรฟอร์ม เป็นต้น



Molecular weight	46.07 g/mol
Assay	99.8 % min. Denatured with 8-12 ppm Denatonium benzoate
Form	Liquid
Color	Colorless
Odor	Alcohol-like
pH Value	7.0 at 20°C
Boiling point/range	78.3 °C
Melting point/range	-114.5 °C
Flash point	12 °C (closed cup)
Ignition temperature	425 °C
Explosion limits	lower 3.5 vol.% upper 15 vol.%
Vapor pressure	59 hPa at 20°C
Density	0.789 g/ml at 20 °C
Refractive index	1.36 at 20 °C
Viscosity	1.2 cP at 25 °C
Dielectric constant	24.55 at 25 °C
Dipole moment	1.66 D at 20 °C
Solubility in Water	Soluble
DOT Hazard Class	3, 6.1, Flammable Liquid, Poison

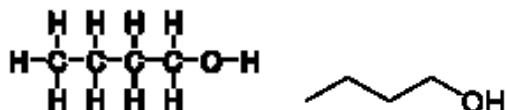


ภาคผนวก ข สมบัติของ 1-โพรพานอล (RCI Labscan (AR Grade); AR1161) 1-โพรพานอล หรือ 1-โพรพิลแอลกอฮอล์ ( $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$ ) เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ในกลุ่มของแอลกอฮอล์ มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะตัว มีความไวไฟสูงมาก



Molecular weight	60.10 g/mol
Assay	99.5 % min.
Form	Liquid
Color	Colorless
Odor	Alcohol-like
pH Value	7.0 at 200g/l H <sub>2</sub> O 20°C
Boiling point/range	96.5-98 °C
Melting point/range	-127 °C
Flash point	22 °C (closed cup)
Ignition temperature	360 °C
Explosion limits	lower 2.1 vol.% upper 19.2 vol.%
Vapor pressure	19 hPa at 20°C
Density	0.804 g/ml at 20 °C
Refractive index	1.387 at 20 °C
Viscosity	2.3 cP at 20 °C
Dielectric constant	20.33 at 25 °C
Dipole moment	3.09 D at 20 °C
Solubility in Water	Miscible in all proportions
DOT Hazard Class	3, Flammable Liquid

**ภาคผนวก ฅ** สมบัติของ 1-บิวทานอล (RCI Labscan (AR Grade); AR1024) 1-บิวทานอล หรือ 1-บิวทิลแอลกอฮอล์ ( $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$ ) เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ในกลุ่มของ แอลกอฮอล์ มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะตัว เป็นสารมีขั้วอ่อนๆ ซึ่งมักใช้เป็นตัว ทำละลาย มีจุดเดือด จุดหลอมเหลวที่ต่ำ ระเหยง่าย ติดไฟได้ง่าย จึงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้



Molecular weight	74.12 g/mol
Assay	99.4 % min.
Form	Liquid
Color	Colorless
Odor	Characteristic
pH Value	7.0 at 70 g/l, $\text{H}_2\text{O}$ 20°C
Boiling point/range	117 °C
Melting point/range	-89.5 °C
Flash point	34 °C (closed cup)
Ignition temperature	345 °C
Explosion limits	lower 1.4 vol.% upper 11.3 vol.%
Vapor pressure	6.7 hPa at 20°C
Density	0.810 g/ml at 20 °C
Refractive index	1.399 at 20 °C
Viscosity	2.95 cP at 20 °C
Dielectric constant	17.80 at 25 °C
Dipole moment	1.66 D at 20 °C
Solubility in Water	77-79 g/l at 20 °C
DOT Hazard Class	3, Flammable Liquid

### ภาคผนวก ญ วิธีการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์

1. เตรียมสารละลาย piranha จากกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ในอัตราส่วนร้อยละ 70:30 โดยปริมาตร ตามลำดับ

*หมายเหตุ* ในการผสมนั้นจะต้องเทกรดซัลฟิวริกลงในภาชนะก่อน แล้วจึงตามด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อป้องกันการระเบิด เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่รุนแรง

2. ต้มแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ขนาด  $1 \times 1$  ตารางเซนติเมตร ในสารละลาย piranha ที่อุณหภูมิ  $70$  องศาเซลเซียสเป็นเวลา  $1$  ชั่วโมง

3. นำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์มาล้างสารละลาย piranha ออก โดยทำ ultrasonic ในน้ำกลั่นเป็นเวลา  $3$  นาที ประมาณ  $2-3$  ครั้ง แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

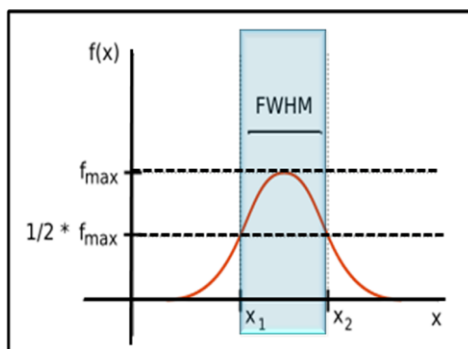
### ภาคผนวก ฎ Full width at half maximum (FWHM)<sup>[104]</sup>

Full width at half maximum (FWHM) คือ ขนาดความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงสูงสุดซึ่งสัมพันธ์กับการกระจายของข้อมูลและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังสมการ

$$\text{สมการการกระจายของข้อมูล } f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right]$$

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma = 2.3548\sigma$$

เมื่อ  $x_0$  คือ ตำแหน่งสูงสุดของพีค  $x$  คือ ตำแหน่งใดๆ และ  $\sigma$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน นิยมนำมาใช้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล เช่น การหาขนาดของอนุภาค เป็นต้น



ภาคผนวก ก ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ<sup>[59]</sup>

cm <sup>-1</sup>	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600-3400	O-H stretching	3650-3590 cm <sup>-1</sup> (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ 3400-3200 cm <sup>-1</sup> (b) แอลกอฮอล์ที่เกิด H-Bonding 3400-2400 cm <sup>-1</sup> (vs, vb) กรดคาร์บอกซิลิก
3500-3200	N-H stretching	3200-3400 cm <sup>-1</sup> (m) 1 <sup>o</sup> เอมีนและเอมีด มี 2 แถบ 3200-3400 cm <sup>-1</sup> (w) 2 <sup>o</sup> เอมีนและเอมีด มี 1 แถบ
3300 (vs)	=C-H stretching	อัลไคน์ที่มี =C-H ที่ปลายโซ่
3100-3000 (w, sh)	=C-H stretching	อัลคีนและเบนซีน (อาจมีหลายพีค)
3000-2800	C-H stretching	หมู่ CH <sub>3</sub> , CH <sub>2</sub> และ CH ของอัลเคน
2850-2780	C-H stretching	แอลดีไฮด์
2250-2225	C=N stretching	ไนทริล (m)
2260-2100	C=C stretching	อัลไคน์ (w) โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้ปรากฏ
1820-1760 (s)	C=O stretching	แอนไฮไดรด์ (s) มี 2 แถบ
1800 (s)	C=O stretching	กรดคลอไรด์
1770 (s)	C=O stretching	แกมมา-แลกโตน
1735 (s)	C=O stretching	เอสเทอร์
1725 (s)	C=O stretching	แอลดีไฮด์
1715 (s)	C=O stretching	คีโตน
1710 (s)	C=O stretching	กรดคาร์บอกซิลิก
1690-1650 (s)	C=O stretching	เอไมด์
1650-1600 (w)	C=C stretching	อัลคีน
1650-1590 (s-m)	N-H bending	1 <sup>o</sup> เอมีน
1650-1550 (w)	N-H bending	2 <sup>o</sup> เอมีน
1620-1590 (s)	N-H bending	1 <sup>o</sup> เอมีด
1550-1510 (s)	N-H bending	2 <sup>o</sup> เอมีด
1600, 1580, 1500 และ 1450	C=C stretching	เบนซีนและเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ ความเข้มไม่แน่นอนอาจมี 2, 3 หรือมีทั้ง 4 แถบ

cm <sup>-1</sup>	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
1520 (s) และ 1350 (s)	NO <sub>2</sub> bending	สารประกอบไนโตร
1465-1450	C-H bending	หมู่ CH <sub>2</sub>
1450-1375	C-H bending	หมู่ CH <sub>3</sub>
1400-1000	C-F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์
1300-1150	CH <sub>2</sub> -X	สารประกอบ Halogen
1300-1000	C-O stretching	อีเทอร์และเอสเทอร์
1220	C-O stretching	ฟีนอล
1150	C-O stretching	3 <sup>o</sup> แอลกอฮอล์
1100	C-O stretching	2 <sup>o</sup> แอลกอฮอล์
1050	C-O stretching	1 <sup>o</sup> แอลกอฮอล์
990 และ 910	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่, RCH=CH <sub>2</sub> )
970	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)
890	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, R <sub>2</sub> C=CH <sub>2</sub> )
815	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่, R <sub>2</sub> C=CHR)
700-690	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, cis)
750 และ 690	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)
750	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ ออโท)
780 และ 700	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบ เมตา)
825-800	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบ พารา)
800-600	C-Cl	สารประกอบคลอไรด์
600-500	C-Br	สารประกอบโบรไมด์
~ 500	C-I	สารประกอบไอโอดีน

คำย่อ: s = ความเข้มสูง vs = ความเข้มสูงมาก m = ความเข้มปานกลาง

w = ความเข้มต่ำ vw = ความเข้มต่ำมาก

sh = แหวมคม b = กว้าง vb = กว้างมาก

OOP = out - of - plane (การสั่นออกนอกระนาบ)

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกษมา จันทรทิพย์ เกิดเมื่อวันที่ 20 มีนาคม พ.ศ. 2528 สถานที่เกิดจังหวัดสระบุรี จบการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2) ภาควิชาวัสดุศาสตร์ สาขาเซรามิก จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2550 จากนั้นได้ไปทำงานในตำแหน่งวิศวกรเซรามิก แผนกวิจัยและพัฒนาเนื้อผลิตภัณฑ์ ที่บริษัท เดอะ สยาม เซรามิก กรุ๊ป อินดัสทรีส์ จำกัด จังหวัดสระบุรี เป็นระยะเวลา 2 ปี และกลับมาศึกษาต่อทางด้านวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และจบการศึกษาใน พ.ศ. 2555

### การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับชาติ

Kasama Chanthornthip, Nisanart Traiphol, Toemsak Srikhirin, Rakchart Traiphol. "Effects of mixed solvent on optical properties and dispersion state of  $\text{TiO}_2$ /MEH-PPV hybrid films", The 1<sup>st</sup> Polymer Conference of Thailand (PCT-1), 7-8 October 2010, Convention center at Chulabhorn research institute, Bangkok.

Kasama Chanthornthip, Nisanart Traiphol, Toemsak Srikhirin, Rakchart Traiphol. "Enhancement of photovoltaic properties and dispersion state of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles/MEH-PPV hybrid films using mixed-solvent systems", The 37<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand (STT 37), 10-12 October 2011, Centara Grand and Bangkok Convention Centre at Central World, Bangkok.